

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA



**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MATERIALES
VOLCÁNICOS DE BAJA DENSIDAD**

TESIS DOCTORAL DE:

MARÍA MARGARITA CONDE PALACIOS

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

**ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ , ALCIBÍADES SERRANO
GONZÁLEZ**

Madrid, 2013

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de geodinámica



**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE
MATERIALES VOLCÁNICOS
DE BAJA DENSIDAD**

TESIS DOCTORAL

MARÍA MARGARITA CONDE PALACIOS

Ingeniera Geóloga

DIRIGIDA POR:

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

ALCIBÍADES SERRANO GONZÁLEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Madrid, 2013

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Geodinámica



**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE
MATERIALES VOLCÁNICOS DE BAJA DENSIDAD**

TESIS DOCTORAL

MARÍA MARGARITA CONDE PALACIOS
Ingeniera Geóloga.

Directores de la tesis: **ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ**

Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

ALCIBÍADES SERRANO GONZÁLEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Madrid, 2013

María Margarita Conde Palacios

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE
MATERIALES VOLCÁNICOS DE BAJA DENSIDAD.**

Tesis Doctoral

Directores:

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

ALCIBÍADES SERRANO GONZÁLEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Ciencias geológicas

Departamento de Geodinámica

Madrid, 2013

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría expresar mi enorme agradecimiento a mis directores de tesis: Alcibíades Serrano y Áurea Perucho. Durante estos cuatro años, Áurea me ha motivado tanto a nivel profesional como personal. Agradezco la confianza que ha depositado en mí en todo momento, ha sido una excelente directora-jefa, de la que he aprendido mucho. Alcibíades, es fantástico trabajar al lado de una persona que sabe tanto y que además lo quiere compartir de una forma sencilla y amena, le agradezco todo lo que me ha enseñado y la confianza depositada en mí. Ambos directores han hecho posible que este trabajo llegara a buen puerto, con sus ideas brillantes, las cuales están presentes en cada uno de los capítulos, sus comentarios y sus continuos ánimos. Ha sido un privilegio tenerlos como directores.

En segundo lugar me gustaría agradecer a mis queridos compañeros de laboratorio, Clemente Arias y José Luis Toledo (“El Tole”), todo el trabajo técnico que hay detrás de esta investigación se ha conseguido gracias a ellos. Desde el primer momento Clemente vino a mi despacho y me dijo tienes que salir y dejar la timidez!, es maravilloso lo bien que explica y la paciencia que ha tenido conmigo en todo este tiempo. Ha sido un gran apoyo durante estos cuatro años en el laboratorio. Mi querido Tole ha sido y es un amigo, un fantástico compañero de laboratorio y una persona entrañable a la que le agradezco lo maravilloso que fue conmigo y todo lo que me ayudó y enseñó.

También quiero agradecerle a María Eugenia Martín Baanante y al equipo del laboratorio de Rocas, por enseñarme a utilizar las máquinas de corte, por ser tan atentos a la hora de sacar las probetas y por poner mucho empeño para que salieran muy bien, cosa que es muy trabajosa.

Y no puede faltar una mención al personal de la Biblioteca del Laboratorio de Geotecnia, D^a Encina Polo y D^a Eva Rodríguez, por su apoyo en la recopilación bibliográfica de esta investigación.

El laboratorio de Geotecnia del CEDEX tiene un lugar especial en mi corazón. Gracias a todos los que de una forma u otra me hicieron sentir a gusto. En especial a Fernando Pardo de Santayana, director del Laboratorio, por poner a disposición los medios de trabajo para realizar esta tesis.

Al profesor Eumenio Ancochea Soto le agradezco el permitirme asistir a sus clases magistrales de Vulcanología y lo mucho que me ayudó tanto a clasificar como a entender la formación de los materiales en estudio.

A la gente del Gobierno de Canarias, Luis Hernández y José Antonio Rodríguez Losada, dos personas fantásticas y excelentes profesionales que se encargaron de enviar las muestras desde las Islas Canarias y que, además, durante los días que pasamos en

Tenerife se portaron estupendamente y nos enseñaron mucho sobre los ambientes volcánicos.

En el aspecto personal, me gustaría agradecer a mi padre, Antonio, todo lo que me ha ayudado a lo largo de estos cuatro años, es mi coach particular. Creo que se ha leído los temas tanto como yo y ha aportado su granito de arena. Esta tesis tiene a mi padre de fondo. Gracias a mi madre, Margarita, y mis maravillosos hermanos, Antonio y Bárbara, a Feli, Curtis, David y Vicky por animarme cuando creía que no iba a lograrlo, aguantar mi mal genio y estar pendiente de mí todo el tiempo.

RESUMEN

Esta investigación supone una continuidad a los trabajos de investigación sobre la resistencia y propiedades geotécnicas de los materiales volcánicos o piroclastos de baja densidad que comenzaron a desarrollarse en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX hace ya 10 años.

En esta investigación se ha avanzado mucho en el conocimiento sobre el comportamiento geotécnico de estos materiales. Además se ha estudiado el comportamiento de otros tipos de piroclastos como son las coladas piroclásticas y las oleadas piroclásticas y, como se ha podido observar a lo largo de todo el estudio, ambos tipos presentan un comportamiento geotécnico similar pero a diferente escala.

Los materiales volcánicos canarios presentan ciertas particularidades geotécnicas. En general, poseen unas características de resistencia no lineales y deformabilidad peculiares y poco conocidas, para cuya valoración es necesario realizar ensayos un tanto sofisticados e interpretarlos a la luz de nuevas teorías, diferentes a las de otros tipos de suelos y rocas. Esto tiene una especial relevancia en los piroclastos de baja densidad, cuya calidad geotécnica suele ser mediocre, ya que se encuentran a medio camino entre los “suelos duros” y las “rocas blandas”.

Debido a ello, con estos materiales se plantean unos problemas específicos en cuanto a posibles colapsos o roturas bruscas, que se producen de forma repentina, sin unas deformaciones previas significativas que sirvan de aviso, así como, en cuanto a la estimación de los empujes que ejercen sobre muros, las cargas admisibles en cimentación de estructuras sobre ellos y en la estabilidad de los taludes formados por los mismos, lo cual tiene una incidencia relevante en el ámbito de la obra civil y la edificación en la Comunidad Canaria. Por ello existe un gran interés por disponer de un marco teórico y práctico que describa y permita estimar las propiedades de resistencia y deformabilidad de los piroclastos canarios.

El objetivo principal de la tesis es el de avanzar en el conocimiento del comportamiento esfuerzo-deformacional de los piroclastos de baja densidad, determinando los factores más influyentes en el mismo, como su estructura o alteración. Se ha prestado especial atención a examinar aspectos que se consideran primordiales tales como: macroporosidad (tamaño y morfología de los poros, tamaño relativo en relación al de las partículas,...), alteración de dichas partículas o relleno parcial o total de los macroporos en materiales alterados por depósitos de cristales o partículas debido a la circulación de fluidos.

Para la realización de este trabajo de investigación se ha llevado a cabo un resumen sobre los ambientes volcánicos, las clasificaciones más utilizadas para las rocas volcánicas, los diferentes productos derivados de una erupción volcánica, etc., con el fin de dar una idea general sobre la geología que engloba los materiales que se investigan en esta tesis. A continuación se ha realizado una revisión bibliográfica relativa al estado

del conocimiento actual acerca del comportamiento mecánico de los piroclastos de baja densidad. De esta revisión se obtuvieron los datos de ensayos de las diferentes coladas analizadas a lo largo de la memoria.

En este trabajo se han propuesto una serie de modelos de comportamiento de estos materiales, basados en diferentes principios. Posteriormente se realiza el estudio del ajuste del comportamiento empírico de los materiales a estos modelos propuestos y se deduce cuál es el modelo de comportamiento que se ajusta mejor a los resultados empíricos de los que se dispone.

Por otro lado, debido a que los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados hasta la fecha, en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Serrano et al, 2007), presentaban una dispersión importante y, además, requerían de la realización de un mayor número de ensayos para poder precisar más las diferentes correlaciones obtenidas se planteó la búsqueda de un piroclasto “artificial”, fabricado en el laboratorio, cuyo comportamiento geotécnico pudiera ser parecido a los piroclastos reales, y con el que se pudieran fabricar una batería de probetas de mayor calidad y homogeneidad a las que someter a diferentes estados de carga, cuyos resultados pudieran presentar una menor dispersión y facilitar la búsqueda de leyes de resistencia. Todos estos ensayos se realizaron con anterioridad a los de las muestras reales y fueron de gran utilidad para poner a punto tanto las técnicas de ensayo como los modelos de ajuste.

Se ha estudiado el ajuste de los modelos propuestos a todos los resultados de ensayo de los que se dispone, tanto de las muestras artificiales como de las reales, y tanto de las ensayadas en este trabajo como en los otros mencionados, examinando la bondad de los ajustes y los valores que se deducen de los diferentes parámetros.

Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados en nuevas muestras de piroclastos se pudieron mejorar las diferentes correlaciones obtenidas en el año 2007 y se obtuvieron otras de igual importancia en la obra civil.

Del estudio realizado se pueden extraer como principales conclusiones las siguientes:

- En relación a la macroporosidad de estos materiales se ha confirmado la existencia de diferentes tipos de porosidad, ya definidos anteriormente (CEDEX, 2007, Santana et al, 2008) y descritos en el Capítulo 3 (Grupo Español, año 2007), principalmente: porosidad “reticular”, “vacuolar”, “mixta” y porosidad “matricial” o “no macroporos”.

- La estructura de estos materiales y, por tanto, su macroporosidad influye mucho en su comportamiento geotécnico.

- Los piroclastos de baja densidad, ya se trate de coladas, oleadas o piroclastos de caída, presentan una estructura parecida y un comportamiento esfuerzo-deformacional formalmente similar, aunque con diferente escala.

-En relación con la resistencia se ha visto que en los ensayos de compresión isotrópica, aquellas muestras con partículas menos resistentes (pómez) presentan un colapso menos brusco, más gradual que las más resistentes (lapillis soldadas), en las que se produce un colapso brusco.

-Por otra parte, se ha comprobado que cuando los materiales piroclásticos se presentan alterados, es decir, con matriz alrededor de las partículas relleno (en diferentes porcentajes) los huecos de la porosidad reticular, no colapsan a bajas presiones de confinamientos (<3.5 MPa). Se cree que esto es debido a que esta matriz ayuda a que estos materiales se comporten de forma plástica bajo ensayos triaxiales, y esto se refleja en la forma de rotura de las mismas, ya que rompen en planos horizontales.

-De los resultados obtenidos tanto en los ensayos de resistencia a compresión simple como Triaxiales (TIS y Compresión Isotrópica) se ha llegado a la conclusión de que en la rotura por compresión simple el efecto predominante (y prácticamente único) es el de la rotura de los contactos entre partículas. Por otra parte, en la rotura por compresión isotrópica, aunque también se produce la rotura de los contactos entre partículas, el efecto predominante es, sin embargo, el de rotura de las propias partículas, lo cual se ha comprobado observando las muestras tras su rotura. Entre ambos extremos, en los ensayos triaxiales de rotura por desviador (TIS) parece que ésta se produce por una combinación de ambos fenómenos, predominando uno u otro según que la presión de confinamiento sea baja (rotura de contactos principalmente), o alta (rotura de partículas principalmente) y, probablemente, también de la relación entre la resistencia de la soldadura y la de la partícula, que quizá podría cuantificarse por la relación entre la resistencia a compresión simple y la isotrópica de un material.

-Se han deducido de forma teórica las formas de rotura esperables en estos materiales, dependiendo de los valores de carga aplicados. Y a continuación, se ha comprobado experimentalmente la existencia de dichas formas de rotura.

-A la vista del estudio realizado se ha considerado conveniente proponer una nueva clasificación de estos materiales, basada en la clasificación previa de la *Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de Canarias* (2011), ampliando el número de litotipos y definiendo unos rangos de valores esperables de los parámetros más relevantes desde el punto de vista geotécnico, que se considera que pueden tener una gran utilidad práctica.

-En cuanto a los criterios de rotura unificados propuestos, se ha obtenido en todos los casos un buen ajuste al modelo Parabólico Colapsable, tanto con los resultados de los materiales artificiales como con los de los reales.

-A partir de estos ajustes se recomiendan unos valores de los diferentes parámetros resistentes de uso práctico en proyectos llevados a cabo en zonas volcánicas cuando no se pueda disponer de la realización de los ensayos necesarios para poder obtener estos valores en laboratorio para cada terreno concreto en estudio.

-En cuanto al ajuste de los modelos teóricos energéticos, el modelo aditivo se ajusta bastante bien para algunas muestras.

-Se han obtenido una serie de correlaciones que permiten estimar como primera aproximación los valores de resistencia a compresión simple (σ_c) y de presión isotropa de colapso (p_{ci}) de estos materiales en función de la densidad seca (γ_d) y de la porosidad de los mismos (n).

*Esta tesis está dedicada a mi
familia, mi vida.*

ÍNDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCION

CAPITULO 2: GEOLOGIA

2.1 INTRODUCCIÓN

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS

2.2.1 Clasificación basada en la textura

2.2.2 Clasificación basada en las Relaciones de Campo

2.2.3 Clasificación basada en la mineralogía y composición modal, en las rocas volcánicas

2.2.4 Clasificación basada en la composición química

2.2.4.1 Concentración Absoluta de Sílice

2.2.4.2 La composición normativa. Norma CIPW

2.2.4.3 Saturación en Sílice

2.2.4.4 Saturación en Aluminio

2.2.4.5 Diagrama TAS

2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MAGMAS

2.3.1 ¿Qué es un magma?

2.3.2 Propiedades físicas de los magmas

2.4 PROCESO ERUPTIVO Y TIPOS DE ERUPCIONES

2.4.1 Proceso eruptivo

2.4.2 Tipos de erupciones

2.4.2.1 Clasificación del tipo de erupción basado en las características de los depósitos de caída y el modo de fragmentación del magma

2.4.2.2 Rasgos característicos de los tipos de erupciones

2.5 MATERIALES EXPULSADOS DURANTE UNA ERUPCIÓN

2.5.1 Flujos o coladas de lava

2.5.2 Depósitos de piroclastos

2.5.3 Mecanismo de formación. Columna Eruptiva

2.5.4 Clasificación de los depósitos piroclásticos

2.5.4.1 Clasificación de las rocas volcaniclásticas en función del tamaño de grano.

Fisher y Schmincke (1984)

2.5.4.2 Clasificación de las rocas volcánicas por Cas y Wright (1987)

2.5.4.3 Clasificación de las rocas volcánicas por McPhie et al. (1993)

2.5.4.4 Clasificación de los depósitos volcanoclásticos primarios según White y Houghton (2006)

2.5.5 Características de los depósitos piroclásticos

CAPITULO 3: ESTADO DEL ARTE

3.1 INTRODUCCIÓN

3.2 PRINCIPALES INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN EL ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS

3.2.1 GRUPO ESPAÑOL

3.2.1.1 Año 1970

3.2.1.2 Año 1971

3.2.1.3 Año 1973

3.2.1.4 Año 1976

3.2.1.5 Año 1997

3.2.1.6 Años 1998 a 2002

3.2.1.7 Año 2006

3.2.1.8 Año 2007

3.2.2 GRUPO ITALIANO

3.2.2.1 Año 1970

3.2.2.2 Año 1993

3.2.2.3 Año 1994

3.2.2.4 Años 1998

3.2.3 GRUPO CANADIENSE

3.2.3.1 Año 1975

3.2.4 GRUPO JAPONÉS

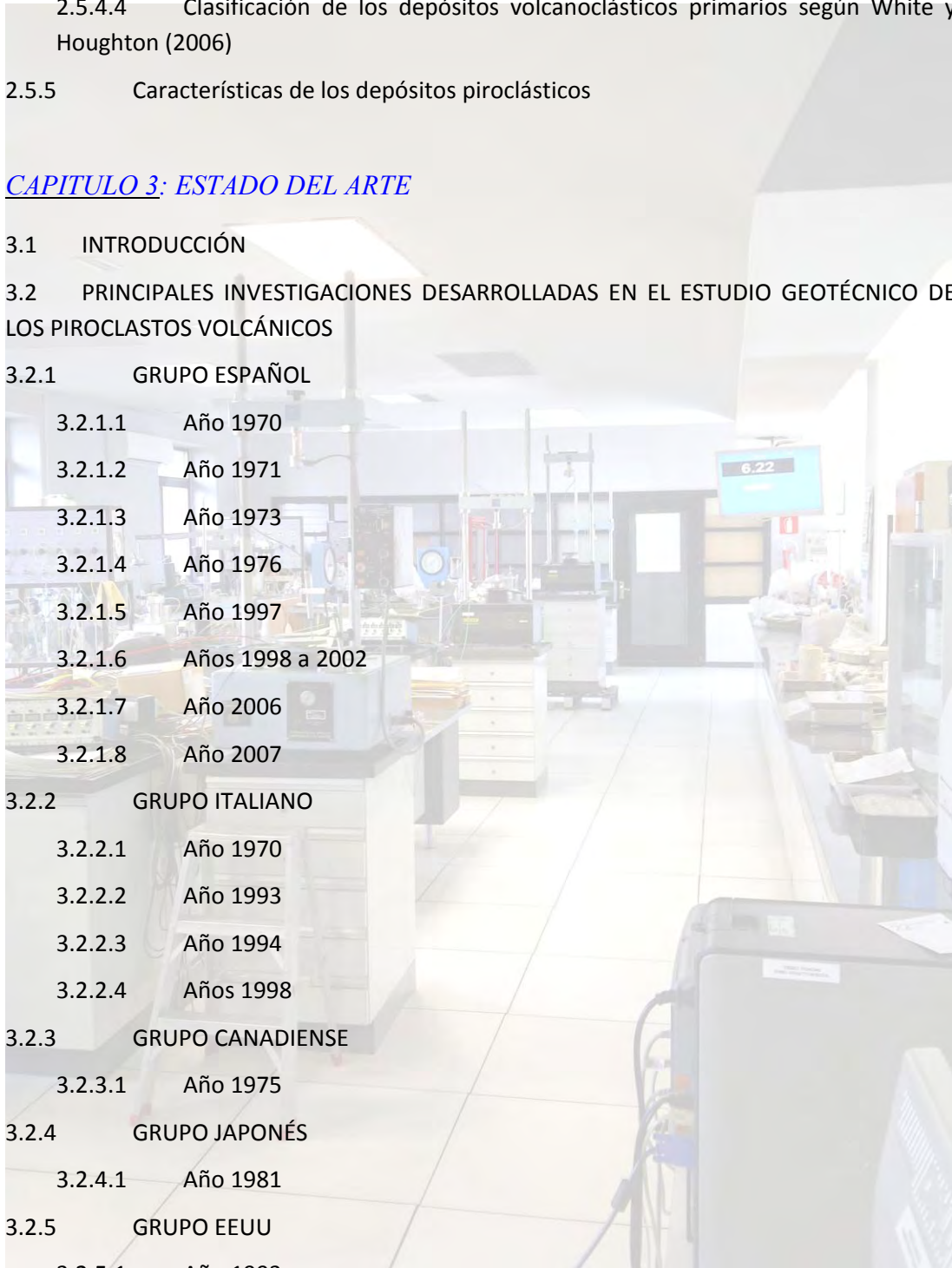
3.2.4.1 Año 1981

3.2.5 GRUPO EEUU

3.2.5.1 Año 1993

3.2.6 GRUPO NUEVA ZELANDA

3.2.6.1 Año 1993



3.2.7 GRUPO REINO UNIDO

3.2.7.1 Año 2000

3.3 RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE

CAPITULO 4: MODELOS PROPUESTOS

4.1 INTRODUCCIÓN

4.2 MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO: CURVAS DE COLAPSO TEÓRICAS

4.2.1 FUNDAMENTOS

4.2.1.1 Conceptos básicos

4.2.1.2 Ley de consumo de energía en los piroclastos

4.2.1.3 Dilatancia

4.2.2 CURVAS DE COLAPSO

4.2.2.1 Curvas aditivas

4.2.2.2 Curvas multiplicativas

4.2.2.3 Curvas asociadas

4.2.3 RESUMEN

4.2.3.1 Sobre los fundamentos

4.2.3.2 Curvas de colapso. Dilatancia no asociada aditiva

4.2.3.3 Curvas de colapso dilatación no asociada multiplicativa

4.2.3.4 Curvas de colapso asociadas

4.3 MODELO EMPÍRICO: AJUSTE EMPÍRICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.3.1 CRITERIOS DE ROTURA UNIFICADOS

4.3.1.1 Variables

4.3.1.2 Familias de curvas de colapso unificadas

4.3.1.3 Ángulo de rozamiento instantáneo y máximo de la curva de colapso

4.3.1.4 Aspecto de la familia E (Fig. 4.10)

4.3.1.5 Aspecto de la familia P (Fig. 4.11)

4.3.1.6 Criterio Parabólico Colapsable (2D). Variables de Hill

4.3.2 DETERMINACION DE PARÁMETROS

4.3.2.1 Procedimiento general

4.3.2.2 Cálculo de los valores β , t , λ iniciales (Caso E)

4.3.2.3 Cálculo de los valores iniciales M , t , λ (Caso P)

4.3.3 AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS

4.3.3.1 Resistencia teórica en ensayos con presión isotropa (Fig. 4.19)

4.3.3.2 Error cuadrático

4.3.3.3 Minimizar el error

4.4 OTROS: CARGA ISÓTROPA DE COLAPSO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS EN FUNCIÓN DE LA MACROPOROSIDAD

4.4.2 MACROESTRUCTURA DE POROS

4.4.3 CARGA ISÓTROPA DE COLAPSO

4.4.3.1 Rocas con estructura de poros reticular

4.4.3.2 Rocas con estructuras de poros vacuolares

4.4.3.3 Conclusión práctica

CAPITULO 5: ESTUDIO EXPERIMENTAL REALIZADO

5.1 INTRODUCCIÓN

5.2 ENSAYOS REALIZADOS

5.2.1 Muestras ensayadas

5.2.1.1 Muestras Artificiales

5.2.1.2 Muestras reales de piroclastos

5.2.2 Tipos de ensayos

5.2.2.1 Resumen de los ensayos realizados

5.2.2.2 Ensayos de Compresión Simple

5.2.2.3 Ensayos de Compresión Isótropa (CI)

5.2.2.4 Ensayos Triaxiales especiales: Triaxial Isotropic Shear (TIS)

5.2.3 Características de los materiales artificiales

5.3 MUESTRAS ARTIFICIALES

5.3.1 Tabla resumen

5.4 ENSAYOS CON PIROCLASTOS REALES

5.4.1 Ensayos de caracterización

5.4.1.1 Análisis de la Macroporosidad

5.4.1.2 Propiedades químicas

5.4.1.3 Propiedades mineralógicas

5.4.1.4 Ensayos de resistencia y deformabilidad

5.4.2 Clasificación geotécnica de los piroclastos de baja densidad

5.4.2.1 Introducción: Clasificación previa

5.4.2.2 Nueva clasificación propuesta

5.5 APÉNDICE: PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS ARTIFICIALES Y REALES

5.5.1 Preparación de las muestras

5.5.1.1 Muestras Artificiales

5.5.1.2 Muestras reales de piroclastos

5.5.2 Etapas realizadas en la búsqueda del 'piroclastos ideal'

5.5.2.1 Conglomerante

5.5.2.2 Probetas BCAP y BCP

CAPITULO 6: APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 INTRODUCCIÓN

6.2 AJUSTES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS AL MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO Y AL EMPÍRICO

6.2.1 Introducción

6.2.2 Ajustes para las muestras artificiales

6.2.2.1 Ajuste empírico

6.2.3 Ajustes para las muestras reales

6.2.3.1 Ajuste empírico

6.2.3.2 Análisis de los parámetros y conclusiones

6.2.3.3 Ajuste teórico

6.3 CURVAS DE CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES PARÁMETROS

6.3.1 Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión simple

6.3.1.1 Resistencia a compresión simple en función de la densidad seca y de la porosidad

6.3.1.2 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión simple

6.3.2 Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión isotrópica

6.3.2.1 Resistencia a compresión isotrópica en función de la densidad seca y de la porosidad

6.3.2.2 Módulos de elasticidad antes y después del colapso. Relación con la

densidad seca

6.3.2.3 Módulos de compresibilidad. Relación con la densidad seca

6.3.2.4 Relación entre la presión isotrópica de colapso y la resistencia a compresión simple

6.4 APÉNDICE 1: AJUSTE EMPÍRICO EN MUESTRAS REALES. CASO ELÍPTICO COLAPSABLE

6.5 APÉNDICE 2: AJUSTE TEÓRICO EN MUESTRAS REALES

6.5.1 Curvas de colapso no asociadas y aditivas

6.5.2 Curvas de fluencia asociadas

CAPITULO 7: RESUMEN Y CONCLUSIONES

7.1 RESUMEN

7.2 CONCLUSIONES

CAPITULO 8: LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

CAPITULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEJOS

ANEJO 1: RESULTADOS DE ENSAYOS

A-1.1 INTRODUCCION.

A-1.2 MUESTRAS ARTIFICIALES.

A-1.2.1 Ensayo de compresión simple.

A-1.2.1.1 Conglomerante.

A-1.2.1.2 Muestras artificiales. Grupos BCAP y BCP.

A-1.2.2 Ensayo de compresión isotrópica. Muestras BCAP.

A-1.2.3 Gráfica resumen de los ensayos TIS. Valores máximos-mínimos y medios.

A-1.3 PIROCLASTOS REALES.

A-1.3.1 Resumen ensayos de compresión simple.

A-1.3.2 Resumen ensayos de compresión isotrópica.

A-1.3.3 Resumen ensayos triaxial TIS.

A-1.3.4 Ensayos de laboratorio. Informe completo.

A-1.3.4.1 Cenizas. M-5141.

A-1.3.4.2 CST-P-3856.

A-1.3.4.3 LPT.M-5142.

A-1.3.4.4 LPT. M-3857.

A-1.3.4.5 LPT. M-5143.

A-1.3.4.6 LPT. M-6632.

A-1.3.4.7 LPT. M-6631.

A-1.4.1.2 LPT-CBT. M-6637.

A-1.5.1.1 LPT. M-7068.

A-1.5.1.2 LPT. M-7069.

A-1.5.1.3 LPT. M-7072.

A-1.5.1.4 LPT. M-7073.

A-1.5.1.5 LPT. M-7075.

A-1.5.1.6 LPT. M-7074.

A-1.5.1.7 LPT. M-7066.

A-1.5.1.8 LPT. M-7067.

A-1.5.1.9 LPT. M-7078.

A-1.5.1.10 EST. M-3825.

A-1.5.1.11 PZT. M-6635 y 6636.

A-1.5.1.12 PZT-M. M-6633.

A-1.5.1.13 PZT.M-6634.

A-1.5.1.14 PZT. M-6638.

A-1.5.1.15 LPT-M. 7076.

A-1.5.1.16 LPT-M. 7077.

A-1.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS REALES.

A-1.6.1 DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO MEDIANTE PICNÓMETRO DE GAS. (NORMA ASTM D5550-94).

A-1.6.1.1 Introducción.

A-1.6.1.2 Fundamentos de la picnometría de helio.

A-1.6.1.3 Descripción del equipo.

A-1.6.1.4 Procedimiento experimental.

A-1.6.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONATOS, SULFATOS SOLUBLES, MATERIA ORGÁNICA Y PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.

A-1.6.2.1 Procedimiento experimental.

A-1.6.3 CONTENIDO DE ÓXIDOS Y ELEMENTOS MAYORITARIOS EN MUESTRA, DETERMINADO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

- A-1.6.3.1 Fundamento teórico.
- A-1.6.3.2 Campo de aplicación de la XRF.
- A-1.6.3.3 Sistema XRF empleado.
- A-1.6.3.4 Determinación del contenido de óxidos y elementos mayoritarios.

A-1.6.4 Resultados obtenidos.

A-1.6.5 DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN MUESTRA DE POLVO MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X.

- A-1.6.5.1 La Difracción de Rayos-X. Descripción del método.
- A-1.6.5.2 Equipamiento.
- A-1.6.5.3 Preparación de muestras.
- A-1.6.5.4 Análisis Experimental.
- A-1.6.5.5 Resultados.
- A-1.6.5.6 TABLA RESUMEN.

ANEJO 2: FOTOGRÁFICO

A-2.1 PIROCLASTOS REALES

A-2.1.1 POMEZ

A-2.1.1.1 M-6634

A-2.1.1.2 M-6638

A-2.1.2 LAPILLIS

A-2.1.2.1 M-3857

A-2.1.2.2 M-6631

A-2.1.2.3 M-6632

A-2.1.2.4 M-7067

A-2.1.2.5 M-7068

A-2.1.2.6 M-7069

A-2.1.2.7 M-7070

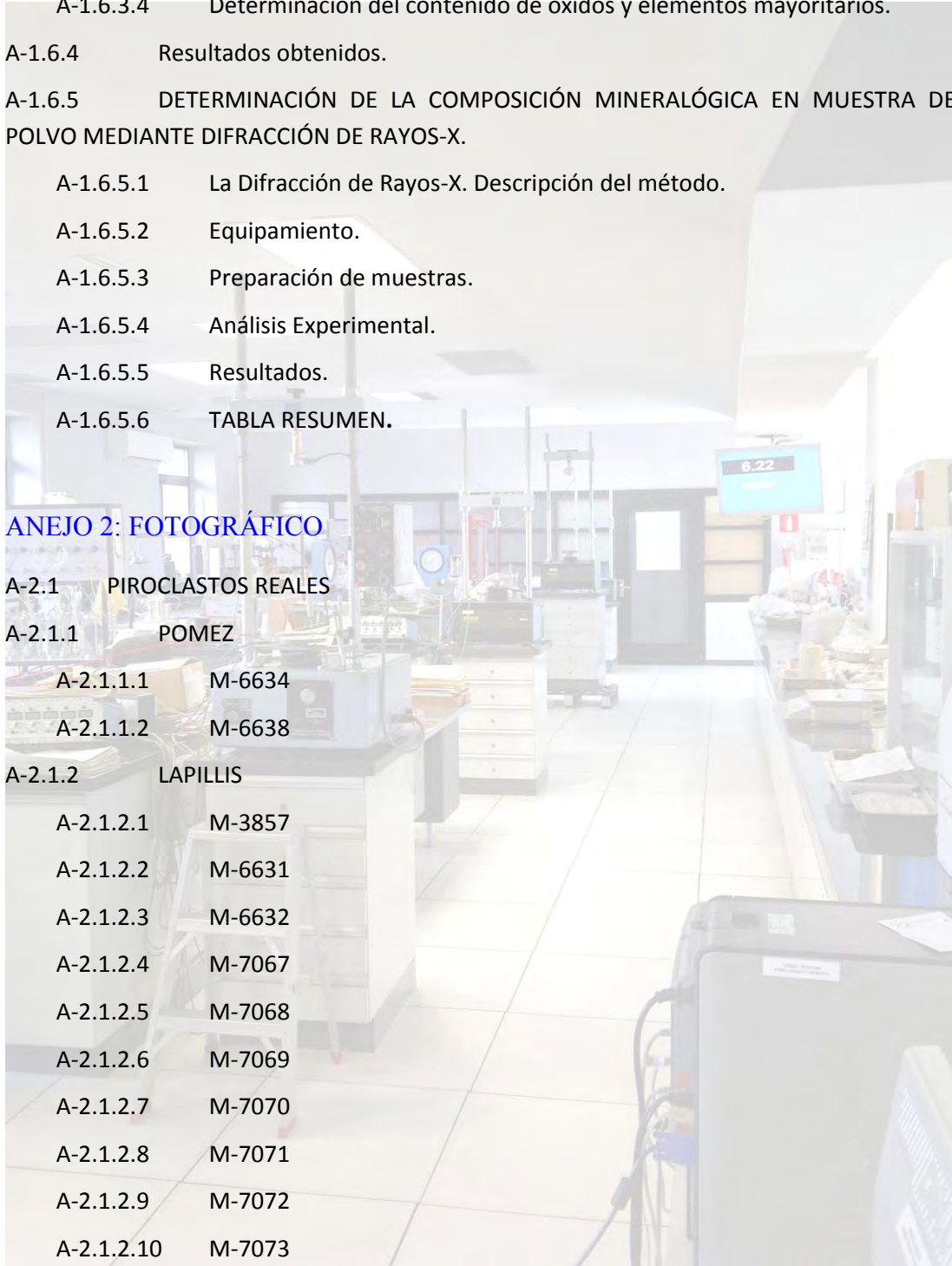
A-2.1.2.8 M-7071

A-2.1.2.9 M-7072

A-2.1.2.10 M-7073

A-2.1.2.11 M-7074

A-2.1.2.12 M-7075



A-2.1.2.13 M-7077

A-2.1.2.14 M-7078

A-2.1.2.15 LPT-07

A-2.1.3 CENIZAS

A-2.1.4 TOBACEAS

A-2.1.4.1 M-6633

A-2.1.4.2 M-7066

A-2.1.4.3 M-7076

A-2.1.4.4 M-7079

A-2.1.4.5 M-3856

A-2.1.5 ESCORIAS

A-2.2 PROBETAS ARTIFICIALES

A-2.2.1 CONGLOMERANTE

A-2.2.1.1 ESCAYOLA+AGUA (EPA)

A-2.2.1.2 CEMENTO+AGUA (CM)

A-2.2.1.3 CEMENTO+AGUA+BENTONITA (CB)

A-2.2.2 PROBETAS ARTIFICIALES

A-2.2.2.1 BCAP (BENTONITA-CEMENTO-ARLITA-POREXPAN)

A-2.2.2.2 BCP (BENTONITA-CEMENTO-POREXPAN)

ANEJO 3: ESTADÍSTICO

A-3.1 MUESTRAS ARTIFICIALES

A-3.1.1 Ensayo de compresión simple.

A-3.1.1.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.1.2 Histogramas de frecuencia.

A-3.1.1.3 Ajuste distribución de probabilidad.

A-3.1.2 Ensayo de compresión isotropa.

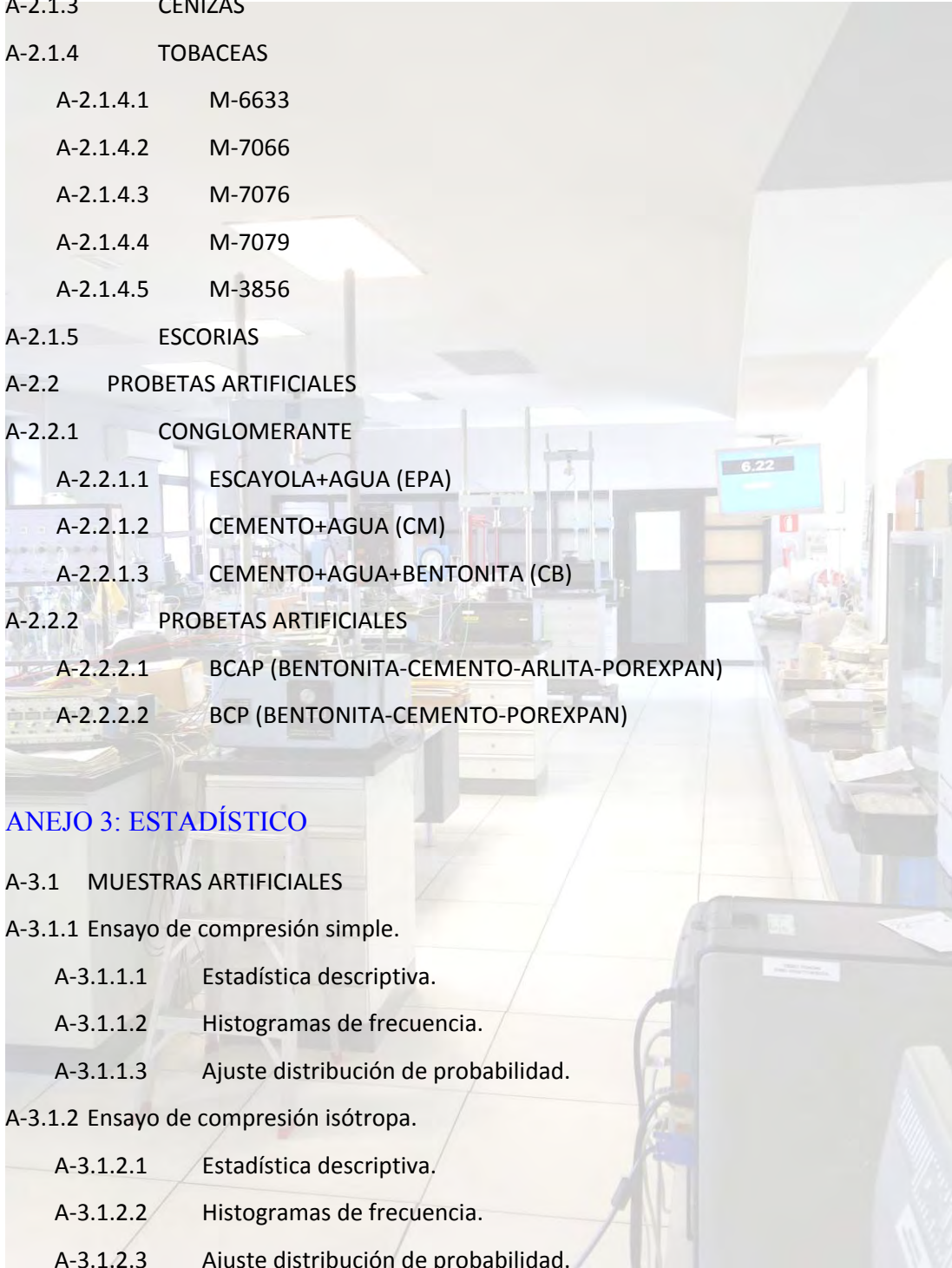
A-3.1.2.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.2.2 Histogramas de frecuencia.

A-3.1.2.3 Ajuste distribución de probabilidad.

A-3.1.3 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=50$).

A-3.1.3.1 Estadística descriptiva.



A-3.1.3.2 Histograma de frecuencia.

A-3.1.3.3 Ajuste distribución de probabilidad.

A-3.1.4 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=100$).

A-3.1.4.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.4.2 Histograma de frecuencia.

A-3.1.4.3 Ajuste curva de distribución.

A-3.1.5 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=160$).

A-3.1.5.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.5.2 Histograma de frecuencia.

A-3.1.5.3 Ajuste curva de distribución.

A-3.1.6 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=200$).

A-3.1.6.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.6.2 Histograma de frecuencia.

A-3.1.6.3 Ajuste curva de distribución.

A-3.1.7 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=250$).

A-3.1.7.1 Estadística descriptiva.

A-3.1.7.2 Histograma de frecuencia.

A-3.1.7.3 Ajuste curva de distribución.

A-3.2 PIROCLASTOS REALES

A-3.2.1 Ensayo de compresión simple.

A-3.2.1.1 Estadística descriptiva.

A-3.2.1.2 Histogramas de frecuencia.

A-3.2.1.3 Ajuste distribución de probabilidad.

A-3.2.2 Ensayo de compresión isotrópica.

A-3.2.2.1 Estadística descriptiva.

A-3.2.2.2 Histogramas de frecuencia.

A-3.2.2.3 Ajuste distribución de probabilidad.

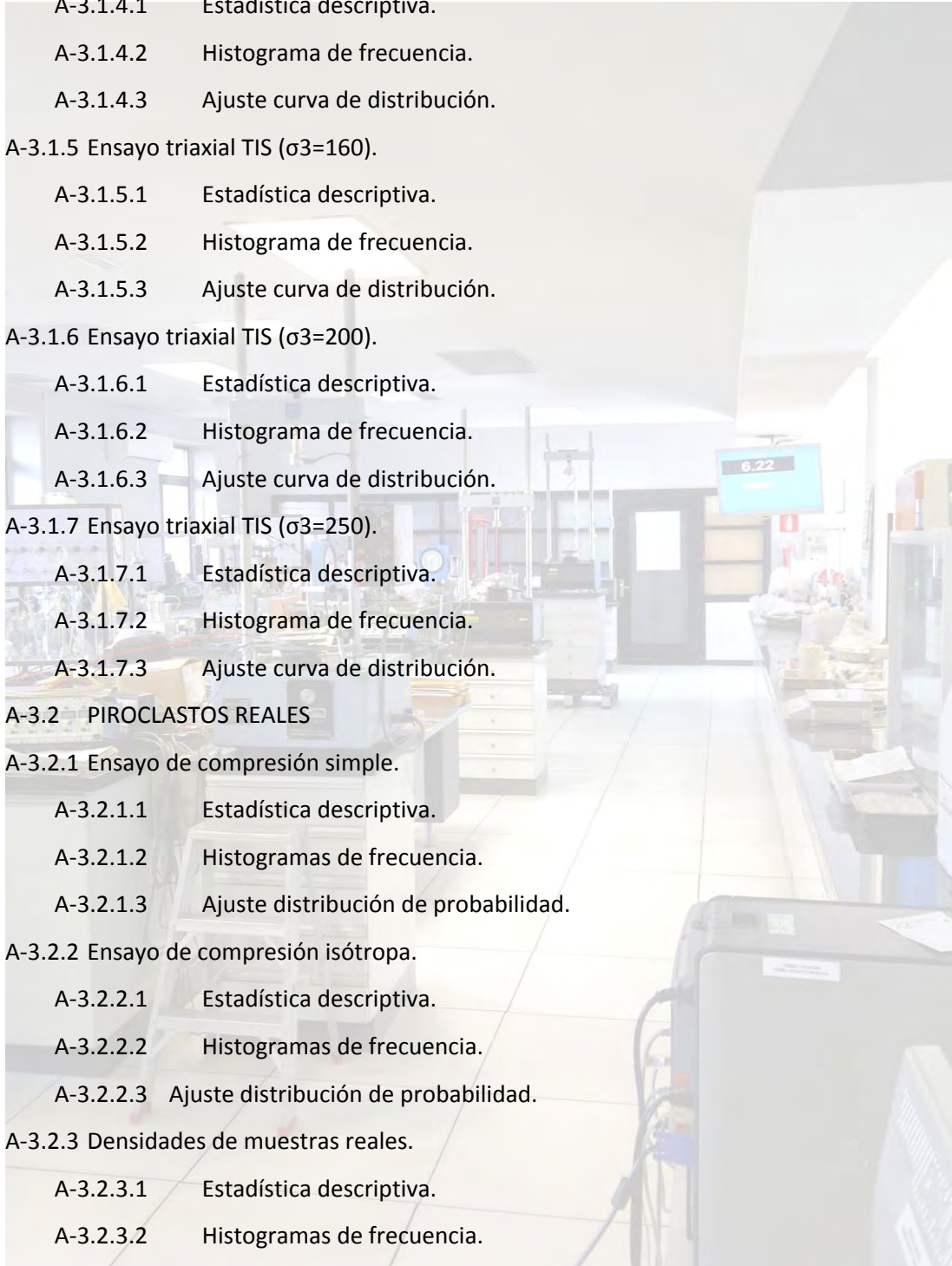
A-3.2.3 Densidades de muestras reales.

A-3.2.3.1 Estadística descriptiva.

A-3.2.3.2 Histogramas de frecuencia.

A-3.2.3.3 Ajuste distribución de probabilidad.

A-3.2.4 Porosidades de los piroclastos canarios.



- A-3.2.4.1 Estadística descriptiva.
- A-3.2.4.2 Histogramas de frecuencia.
- A-3.2.4.3 Ajuste distribución de probabilidad.

ANEJO 4: AJUSTE RIGUROSO DE LOS PARÁMETROS

A-4.1 INTRODUCCIÓN

- A-4.1.1 Idea general del método de ajuste
- A-4.1.2 Terminología

A-4.2 PASOS BÁSICOS

- A-4.2.1 Ajuste de la presión de colapso
- A-4.2.2 Rotura teórica con desviador
- A-4.2.3 Errores cuadráticos de la curva de parámetros $M\beta, t, \sigma_c, \lambda$
- A-4.2.4 Trayectoria de ajuste

A-4.3 PROGRAMAS

A-4.3.1 Lista de programas

- A-4.3.1.1 Listado
- A-4.3.1.2 Articulación de las subrutinas

A-4.3.2 Subrutina ASIGMA

- A-4.3.2.1 Función
- A-4.3.2.2 Input
- A-4.3.2.3 Output
- A-4.3.2.4 Diagrama de flujo de ASIGMA

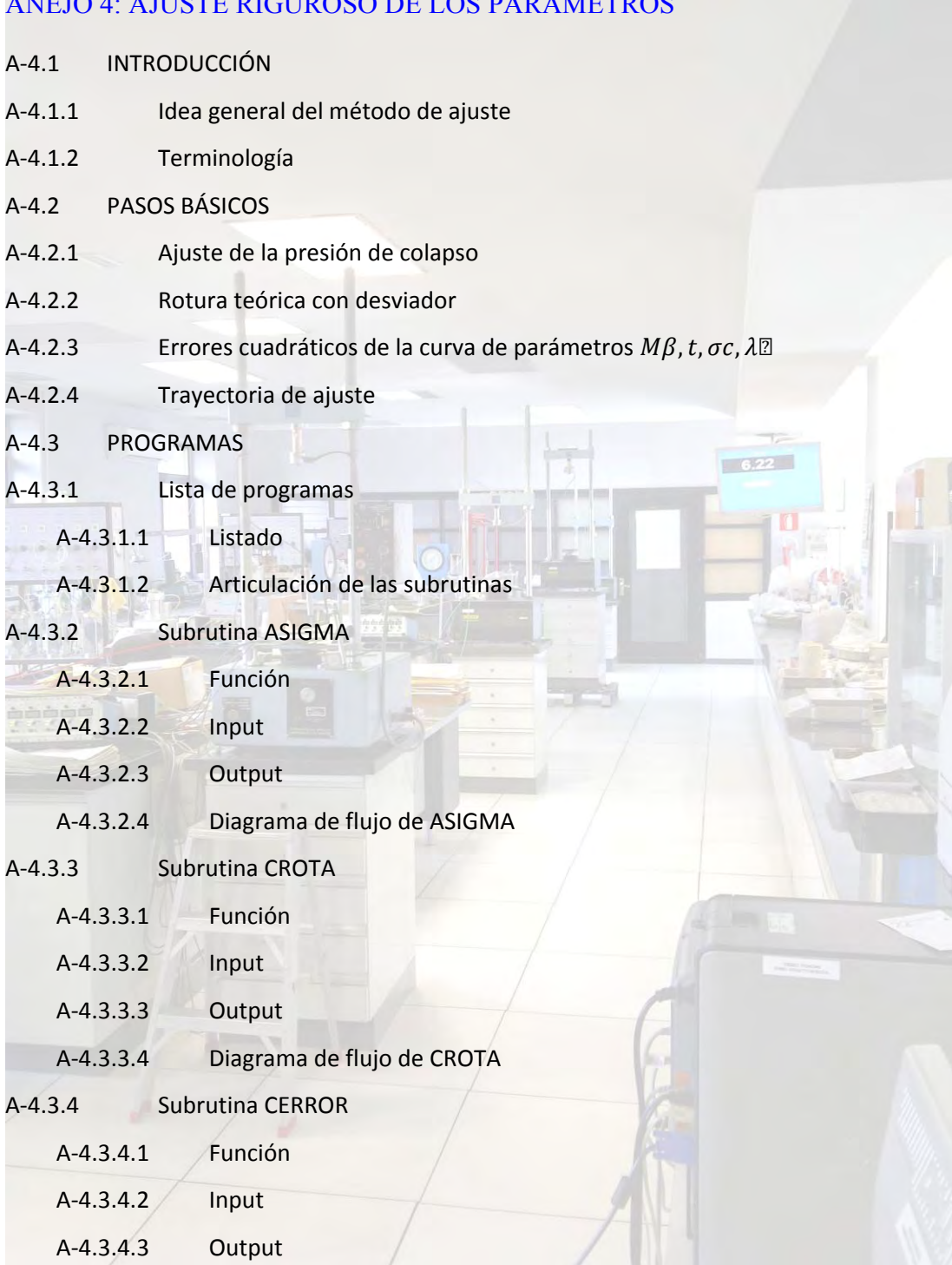
A-4.3.3 Subrutina CROTA

- A-4.3.3.1 Función
- A-4.3.3.2 Input
- A-4.3.3.3 Output
- A-4.3.3.4 Diagrama de flujo de CROTA

A-4.3.4 Subrutina CERROR

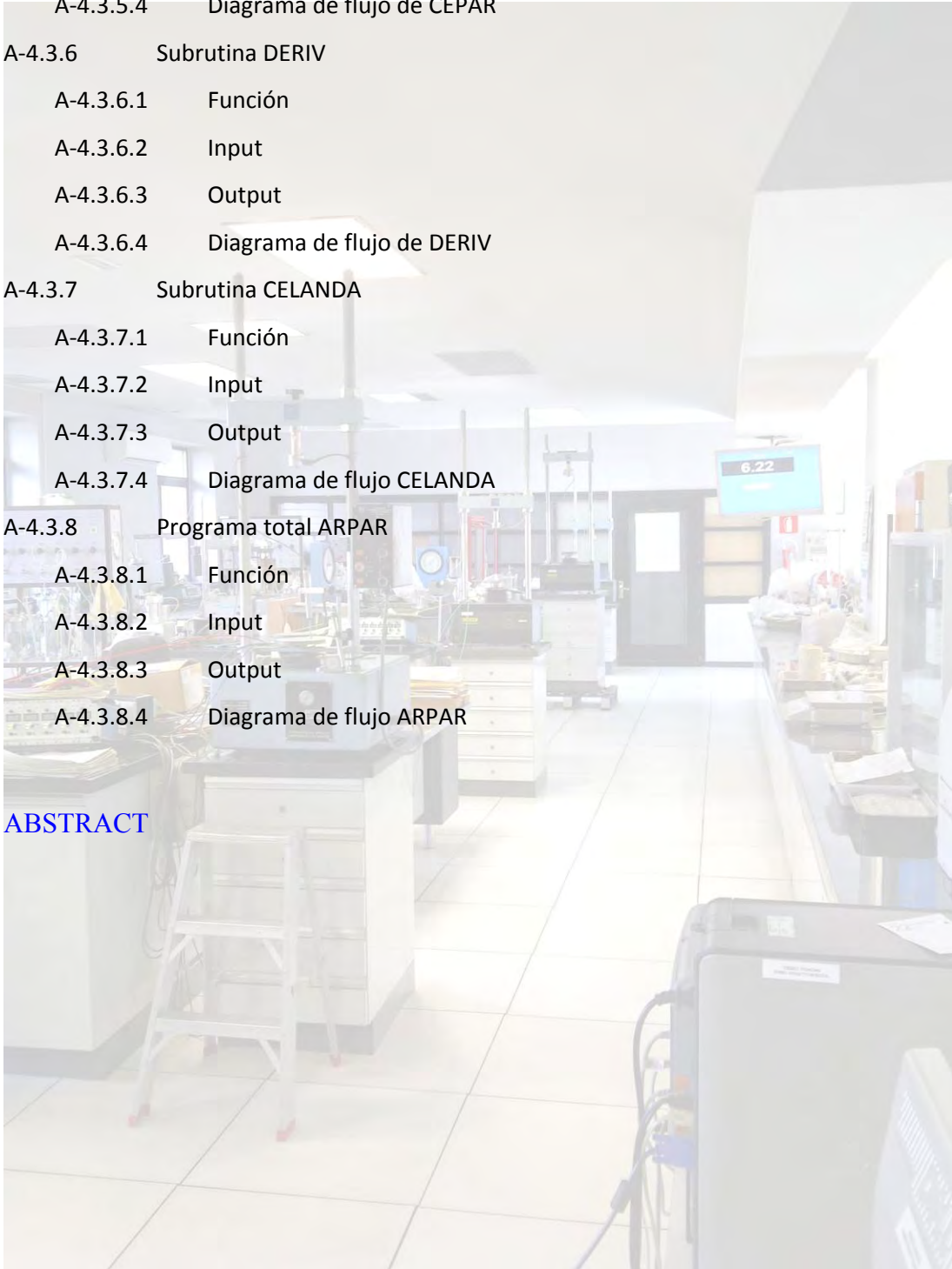
- A-4.3.4.1 Función
- A-4.3.4.2 Input
- A-4.3.4.3 Output
- A-4.3.4.4 Diagrama de flujo de CERROR

A-4.3.5 Subrutina CEPAR



A-4.3.5.1	Función
A-4.3.5.2	Input
A-4.3.5.3	Output
A-4.3.5.4	Diagrama de flujo de CEPAR
A-4.3.6	Subrutina DERIV
A-4.3.6.1	Función
A-4.3.6.2	Input
A-4.3.6.3	Output
A-4.3.6.4	Diagrama de flujo de DERIV
A-4.3.7	Subrutina CELANDA
A-4.3.7.1	Función
A-4.3.7.2	Input
A-4.3.7.3	Output
A-4.3.7.4	Diagrama de flujo CELANDA
A-4.3.8	Programa total ARPAP
A-4.3.8.1	Función
A-4.3.8.2	Input
A-4.3.8.3	Output
A-4.3.8.4	Diagrama de flujo ARPAP

ABSTRACT



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 Objetivo del estudio

Los materiales volcánicos canarios presentan ciertas particularidades geotécnicas. En general, poseen unas características de resistencia no lineales y deformabilidad peculiares y poco conocidas, para cuya valoración es necesario realizar ensayos un tanto sofisticados e interpretarlos a la luz de nuevas teorías, diferentes a las de otros tipos de suelos y rocas. Esto tiene una especial relevancia en los piroclastos de baja densidad, cuya calidad geotécnica suele ser mediocre, ya que se encuentran a medio camino entre los “suelos duros” y las “rocas blandas”.

Debido a ello, con estos materiales se plantean unos problemas específicos en cuanto a posibles colapsos o roturas bruscas, que se producen de forma repentina, sin unas deformaciones previas significativas que sirvan de aviso, así como, en cuanto a la estimación de los empujes que ejercen sobre muros, las cargas admisibles en cimentación de estructuras sobre ellos y en la estabilidad de los taludes formados por los mismos, lo cual tiene una incidencia relevante en el ámbito de la obra civil y la edificación en la Comunidad Canaria. Por ello existe un gran interés por disponer de un marco teórico y práctico que describa y permita estimar las propiedades de resistencia y deformabilidad de los piroclastos canarios.

Aunque ha habido estudios anteriores, referenciados en el Capítulo 3 “Estado del Arte”, que han supuesto avances en el conocimiento del comportamiento geotécnico de este tipo de materiales, aún quedan muchos aspectos y características geotécnicas de ellos por conocer más a fondo.

El objetivo principal de la tesis es el de avanzar en el conocimiento del comportamiento esfuerzo-deformacional de los piroclastos de baja densidad, determinando los factores más influyentes en el mismo, como su estructura o alteración. Se ha prestado especial atención a examinar aspectos que se consideran primordiales tales como: macroporosidad (tamaño y morfología de los poros, tamaño relativo en relación al de las partículas,...), alteración de dichas partículas o relleno parcial o total de los macroporos en materiales alterados por depósitos de cristales o partículas debido a la circulación de fluidos.

Más concretamente, del estudio planteado se ha pretendido obtener:

- a. Un criterio de rotura de estos materiales que, en función de unos pocos parámetros, permita estimar las tensiones máximas aplicables en los mismos.
- b. Una clasificación geotécnica de los principales tipos de piroclastos de baja densidad, que permita definir un tipo de comportamiento y unos

valores o rangos de valores típicos de estos parámetros para cada grupo definido.

- c. Una mayor cantidad de datos de ensayos de los materiales volcánicos de baja densidad, con el fin de mejorar las diferentes correlaciones obtenidas en estudios anteriores y tratar de obtener otras de igual importancia en la obra civil.

1.1.2 Trabajos realizados

Los trabajos llevados a cabo a lo largo de esta investigación se resumen a continuación de forma concisa:

- En primer lugar se ha realizado un estudio bibliográfico sobre los ambientes volcánicos, las clasificaciones más utilizadas para las rocas volcánicas, los diferentes productos derivados de una erupción volcánica, etc., con el fin de dar una idea general sobre la geología que engloba los materiales que se investigan en esta tesis. Este estudio se ha recogido en el Capítulo 2: Geología.
- Se ha realizado una revisión bibliográfica relativa al estado del conocimiento actual acerca del comportamiento mecánico de los piroclastos de baja densidad. Aunque en muchos casos se trata de coladas y oleadas piroclásticas, que son materiales con diferente génesis que los estudiados en esta tesis, su estructura es similar a la de los piroclastos de caída y su comportamiento esfuerzo-deformacional también lo es, sólo que a diferente escala, por lo que conocer su comportamiento ha ayudado a avanzar en el estudio de los piroclastos de caída. Esta revisión se ha reflejado en el Capítulo 3: Estado del Arte. Además, de esta revisión, se obtuvieron los datos de ensayos de las diferentes coladas analizadas en Capítulos posteriores.
- Se han propuesto, en el Capítulo 4, una serie de modelos de comportamiento de estos materiales, basados en diferentes principios. Posteriormente, en el Capítulo 6, se realiza el estudio del ajuste del comportamiento empírico de los materiales a estos modelos propuestos y se deduce cuál es el modelo de comportamiento que se ajusta mejor a los resultados empíricos de los que se dispone.
- Debido a que los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados hasta la fecha, en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Serrano et al, 2007), presentaban una dispersión importante y, además, requerían de la realización de un mayor número de ensayos para poder precisar más las diferentes correlaciones obtenidas, se planteó la búsqueda de un piroclasto

“artificial”, fabricado en el laboratorio, cuyo comportamiento geotécnico pudiera ser parecido a los piroclastos reales. En el Capítulo 5: Estudio experimental realizado, se recogen las diferentes etapas en la búsqueda del “piroclasto ideal”.

- Para el estudio geotécnico de los piroclastos, por tanto, se recopilaron, por un lado, datos obtenidos en el año 2007 (Serrano et al., 2007), en el año 1976 (Uriel et al.1976, Serrano, 1976, y en diferentes estudios llevados a cabo en varios países sobre rocas piroclásticas; y por otro lado, se realizó una nueva campaña de ensayos, constituida por 24 muestras en bloques traídas de diferentes partes de las Islas Canarias, con las que se tallaron más de 250 probetas de ensayo.

Se ha estudiado el ajuste de los modelos propuestos a todos los resultados de ensayo de los que se dispone, tanto de las muestras artificiales como de las reales, y tanto de las ensayadas en este trabajo como en los otros mencionados, examinando la bondad de los ajustes y los valores que se deducen de los diferentes parámetros, lo cual se expone en el siguiente apartado.

- A partir de los resultados de los ensayos realizados y recopilados, se ha elaborado una clasificación geotécnica de los piroclastos de baja densidad y se han definido unos rangos típicos de valores para cada grupo de materiales definido, que se han recogido en el Capítulo 5.
- Se han obtenido correlaciones entre diferentes parámetros, algunas de ellas complementando correlaciones anteriores con un número muy superior de datos, y otras nuevas, que se considera que pueden ser de gran utilidad práctica. Estas correlaciones se han recopilado en el Capítulo 6.
- Se ha llegado a unas conclusiones concretas y de gran aplicación práctica, que se han expuesto en el Capítulo 7.
- En el Capítulo 8 se han apuntado unas futuras líneas de investigación que se considera que sería interesante seguir para continuar profundizando en el comportamiento geotécnico de estos materiales tan complejos.
- Por último, en el Capítulo 9 se han recopilado las referencias de la bibliografía que se ha consultado y que ha servido de apoyo a toda esta investigación.

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA



ÍNDICE

2.1	INTRODUCCIÓN.....	1-3
2.2	CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS.....	2-5
2.2.1	Clasificación basada en la textura	2-5
2.2.2	Clasificación basada en las Relaciones de Campo.....	2-7
2.2.3	Clasificación basada en la mineralogía y composición modal, en las rocas volcánicas.....	2-8
2.2.4	Clasificación basada en la composición química.....	2-12
2.2.4.1	Concentración Absoluta de Sílice:.....	2-12
2.2.4.2	La composición normativa. Norma CIPW:	2-12
2.2.4.3	Saturación en Sílice:	2-13
2.2.4.4	Saturación en Aluminio:	2-13
2.2.4.5	Diagrama TAS:	2-14
2.3	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MAGMAS	3-16
2.3.1	¿Qué es un magma?	3-16
2.3.2	Propiedades físicas de los magmas	3-16
2.4	PROCESO ERUPTIVO Y TIPOS DE ERUPCIONES	4-24
2.4.1	Proceso eruptivo.....	4-24
2.4.2	Tipos de erupciones.....	4-25
2.4.2.1	Clasificación del tipo de erupción basado en las características de los depósitos de caída y el modo de fragmentación del magma.....	4-25
2.4.2.2	Rasgos característicos de los tipos de erupciones.....	4-27
2.5	MATERIALES EXPULSADOS DURANTE UNA ERUPCIÓN	5-30
2.5.1	Flujos o coladas de lava	5-30
2.5.2	Depósitos de piroclastos.....	5-32
2.5.3	Mecanismo de formación. Columna Eruptiva	5-33
2.5.4	Clasificación de los depósitos piroclásticos.....	5-37
2.5.4.1	Clasificación de las rocas volcanoclásticas en función del tamaño de grano. Fisher y Schmincke (1984):	5-42
2.5.4.2	Clasificación de las rocas volcánicas por Cas y Wright (1987): ..	5-43
2.5.4.3	Clasificación de las rocas volcánicas por McPhie et al. (1993):...	5-45
2.5.4.4	Clasificación de los depósitos volcanoclásticos primarios según	

White y Houghton (2006):	5-49
2.5.5 Características de los depósitos piroclásticos	5-50

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo es la recopilación de diferentes estudios publicados tanto en libros como en revistas sobre vulcanología. El objetivo es crear una base geológica sobre los materiales estudiados con el fin de entender el comportamiento geotécnico de los mismos, el cual está muy ligado a la génesis de estos materiales.

El capítulo es un resumen sobre los ambientes volcánicos, las clasificaciones que se suelen utilizar en relación a las rocas magmáticas, sus productos, etc.; con el fin de dar una idea sobre la geología que engloba los materiales que se investigan en esta tesis.

Los volcanes no se encuentran distribuidos al azar en el planeta, sino que se concentran en los límites de las placas tectónicas (Fig. 2.1). Las zonas de bordes constructivos ó dorsales oceánicas (Fig. 2.1 A) son aquellas zonas donde las placas se separan, el manto asciende y esto hace que disminuya la presión por lo que éste se funde. En las zonas de subducción (Fig. 2.1 B), una placa oceánica más densa se introduce por debajo de otra placa, oceánica o continental. A medida que la placa oceánica va descendiendo, se va calentando y fundiendo y sus materiales se incorporan al manto. Las zonas de subducción coinciden con fosas marinas de mucha profundidad, como la de Chile, Filipinas, Marianas (que alcanza los 11.000 m. de profundidad), Kuriles, Aleutianas, etc. Como la placa descendente se funde, se forman magmas que ascienden a la superficie por ser más ligeros y dan lugar a la aparición de volcanes.

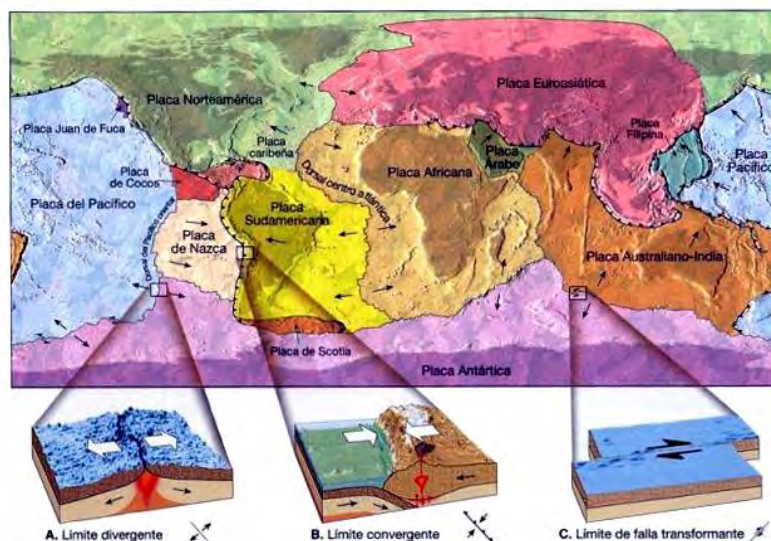


Fig. 2.1: Mapa de las placas en que se divide la litosfera, y su relación con el vulcanismo (W.B. Hamilton, U.S. Geological Survey).

La mayoría de los volcanes activos se encuentran a lo largo de los márgenes de las cuencas oceánicas, particularmente, dentro del cinturón que rodea al pacífico, conocido con el nombre de Cinturón de Fuego del Pacífico (Fig. 2.2).

En la Fig. 2.2 se observa también magmatismo en el interior de las placas oceánicas, estas zonas están relacionadas con puntos de elevado flujo térmico y son los denominados Puntos Calientes. En estos puntos se produce una fusión parcial de la litosfera que tiene encima y el ascenso del magma. Las columnas ascendentes de magma y manto se llaman plumas, y originan islas volcánicas.

Estas plumas, que pueden alcanzar cientos de kilómetros de diámetro mantienen una posición fija en la astenosfera; el movimiento de la placa litosférica sobre la pluma o punto caliente da como resultado una alineación de islas volcánicas según el movimiento de la placa. Ejemplos de este tipo de vulcanismo son las islas Hawai.



Fig. 2.2: Cinturón de Fuego del Pacífico (Best, M. G., 2003).

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS

Existen diferentes criterios de clasificación para las rocas volcánicas; por lo tanto, para una misma roca existen diferentes nombres. “Una roca puede clasificarse (darle nombre) en base a criterios de ubicación en el campo y a su examen con lupa, sólo para ser renombrada cuando es examinada en secciones delgadas y quizás vuelta a clasificar una tercera vez cuando es examinada químicamente....Esquemas diferentes enfocan objetos diferentes” (Williams et al., 1982, p.68).

A continuación se presentan los criterios de clasificación más utilizados en la práctica, basados en:

1. La textura.
2. Las relaciones de campo.
3. La mineralogía y la composición modal.
4. La composición química.

2.2.1 Clasificación basada en la textura

En base a su textura las rocas volcánicas se pueden clasificar en dos grupos: rocas magmáticas y rocas volcanoclásticas. A continuación se describen las principales características de las mismas.

a) Rocas magmáticas:

La textura magmática está definida esencialmente por procesos que dependen del intervalo de tiempo durante el cual el magma está en proceso de solidificación, así como de la razón de pérdida de calor, o enfriamiento.

Existen, principalmente, cuatro tipos de texturas que pueden aparecer en las rocas magmáticas; dichas texturas están determinadas por las condiciones de cristalización del magma (ver Foto.2.1).

Fanerítica: *del griego phaneros (visible)*, es un término aplicado a rocas cuyo tamaño de los cristales son lo suficientemente grandes como para ser identificados a simple vista (excepto minerales accesorios). Esta textura es típica de las rocas cristalizadas en una intrusión magmática cuyo enfriamiento ha sido lento.

Afanítica: *el prefijo a- indica negación, a phaneros (no visible)*. Se aplica a rocas con un tamaño de cristal tan pequeño que sólo pueden diferenciarse mediante el microscopio. La textura afanítica es más común en magmas extrusivos solidificados rápidamente, pero también se puede encontrar en partes marginales del magma intrusivo emplazado en la corteza superficial fría.

Porfíricas: se usa para nombrar rocas en las cuales algunos minerales se

presentan en forma de grandes cristales embebidos en un conjunto de elementos de menor tamaño, que puede ser incluso de naturaleza vítrea. Los cristales de gran tamaño se denominan fenocristales, y los más pequeños constituyen la matriz.

Vítrea: designa rocas que contienen proporciones variables de vidrio, en contraste con las rocas holocristalinas constituidas enteramente de cristales.



Foto.2.1: Texturas Volcánicas. Arriba izquierda: Afanítica, Arriba derecha: Phanerítica, Abajo izquierda: Porfídica, Abajo derecha: Vítrea.

b) Rocas volcanoclásticas.

La textura de las rocas volcanoclásticas se produce por cualquier proceso de fragmentación que da lugar a trozos de rocas y/o minerales. La clasificación de las volcanoclásticas es paralela a la clasificación de los clastos sedimentarios, la cual se basa en los tamaños de las partículas / fragmentos (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Clasificación de las rocas volcanoclásticas en función del tamaño de partículas.

Tamaño de partículas	<2 mm	2-64 mm	>64 mm
Volcanoclastos	Cenizas	Lapilli	Bloque, Bomba
Clastos sedimentarios.	Arcilla	Gránulo	Canto
	Limo	Gravas	Bloque
	Arena		

La Fig.2.3 muestra la clasificación utilizada para nombrar a las rocas volcanoclásticas, que son aquellas rocas producidas por la consolidación de los volcanoclastos.

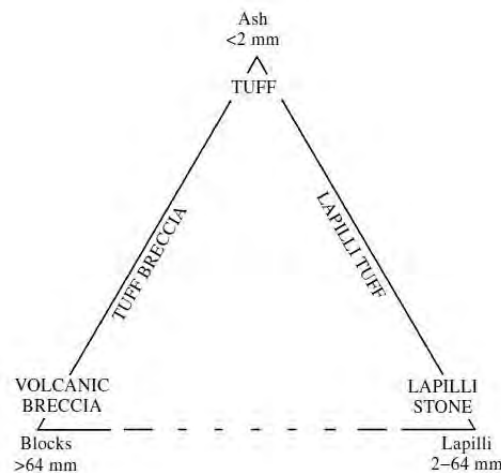


Fig.2.3: Clasificación de los tipos de rocas volcanoclásticas (en mayúsculas) basada en el tamaño de las partículas. (Myron G Best, 2003).

2.2.2 Clasificación basada en las Relaciones de Campo

En función de la localización del magma (Fig.2.4), se reconocen tres categorías para las rocas solidificadas: aquellas que provienen de magmas emplazados encima de la superficie de la Tierra (Volcánicas o Extrusivas), las que se forman dentro de la corteza somera (Intrusivas Hipabisales o Hipoabisales o Subvolcánicas), y que se localizan dentro de la corteza profunda (Intrusiva Plutónica). Las primeras y las últimas se distinguen fácilmente en función de su relación en el campo pero con más dificultad en función de su tamaño de grano, grado de cristalización y composición mineralógica.

Los flujos de lavas coherentes y los depósitos fragmentarios forman las rocas volcánicas o extrusivas. Estas rocas presentan típicamente texturas afaníticas y vítreas, muchas son porfídicas y algunas volcanoclásticas. A altas temperaturas, es común la presencia de sanidina (un feldespato alcalino). Otros minerales que se producen sólo a altas temperaturas y bajas presiones en ambientes volcánicos, como son la leucita, tridimita y cristobalita, se presentan en algunas rocas volcánicas. Los anfíboles y biotita, especialmente cuando aparecen como fenocristales, suelen alterarse parcialmente a finas partículas de agregados de anhídros de Fe, piroxenos, y feldespatos. Los fenocristales de feldespatos comúnmente contienen inclusiones vítreas.

Las rocas intrusivas o plutónicas se forman, a partir de un enfriamiento lento y en profundidad, del magma. Este enfriamiento lento permite el crecimiento de grandes cristales de minerales puros, de ahí que tengan, típicamente, textura Fanerítica.

Dentro de las rocas plutónicas se distinguen (Fig.2.4): el Batolito o Plutón,

consistente en una masa rocosa de grandes proporciones localizada en las zonas más profundas de la litosfera, y que aflora en la superficie por erosión de las capas superiores o por fallas; los Lacolitos, o masas muy viscosas, que no llegan a salir a la superficie, de forma lenticular y que se encuentran interestratificadas en rocas sedimentarias, los estratos situados por encima suelen quedar abombados en forma de domo por efecto de la presión que ejercen sobre ellos; y los Lopolitos, o intrusiones de forma aplanada situados entre los estratos sedimentarios.

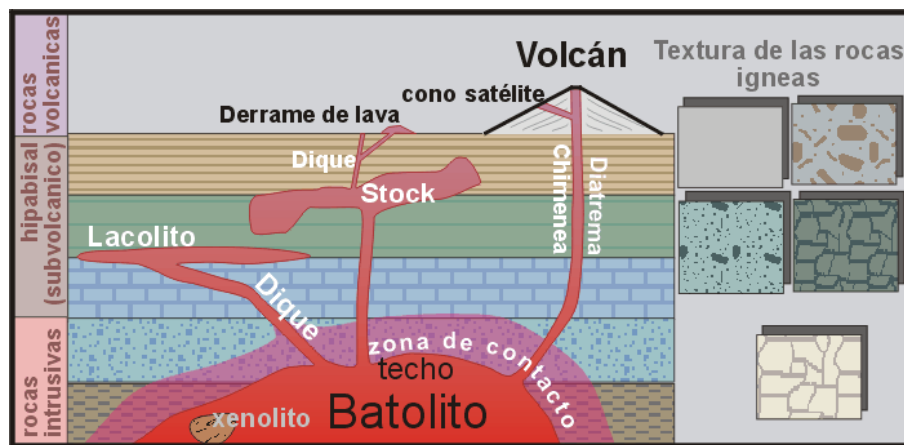


Fig.2.4: Tipos de rocas ígneas. Rocas Volcánicas y Rocas Plutónicas.

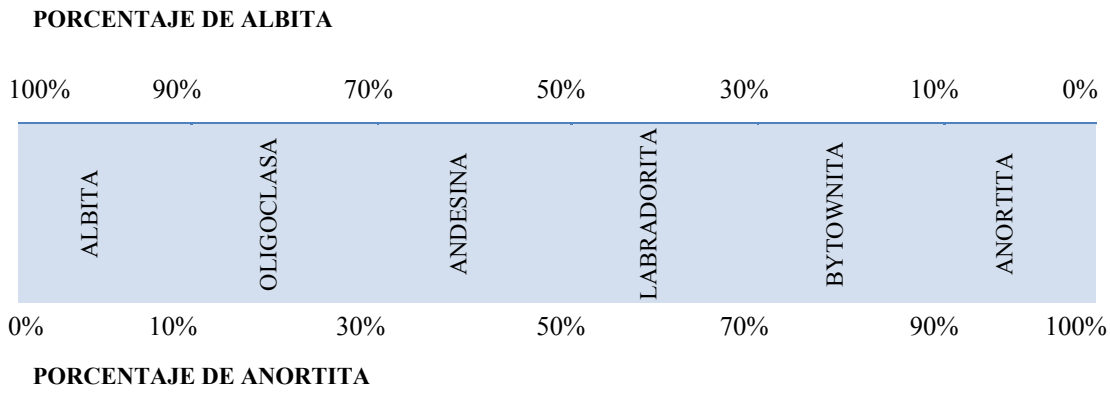
2.2.3 Clasificación basada en la mineralogía y composición modal, en las rocas volcánicas

Un magma al enfriarse, cristaliza formándose diferentes minerales. Los minerales presentes en las rocas volcánicas son:

1. Cuarzo. Mineral formado por dióxido de sílice, está presente en rocas intermedias y ácidas. La cantidad total de sílice en una roca no está reflejada necesariamente en la cantidad de cuarzo presente; rocas con contenidos de cuarzo tan diferentes como 0 y 35% pueden tener la misma cantidad de sílice.

2. Feldespatos. Silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio; son un grupo importante. Las plagioclasas son los feldespatos cuya composición varía entre dos miembros: la albita, feldespato sódico y la anortita, feldespato cálcico. La variación se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Tipos de feldespatos en función de su composición.



La oligoclasa y la andesina son comunes en lavas intermedias, la labradorita es común en los basaltos. Los feldespatos ricos en potasio incluyen la ortoclasa y la microclina. Una variedad de la ortoclasa llamada sanidina es el feldespato potásico más frecuente en las rocas volcánicas.

3. Feldespatoides. Con respecto a los feldespatos, tienen menos sílice en su estructura. Como se verá más adelante, las rocas ácidas no contienen feldespatoides. La nefelina es el feldespatoide sódico, y la leucita es el potásico.

4. Micas. El grupo de minerales de la mica presentes en este tipo de rocas también son silicatos de aluminio. Los dos minerales principales en el grupo de la mica son la moscovita (no volcánica), la cual es rica en potasio, la biotita que contiene magnesio y hierro así como también potasio en su estructura cristalina.

5. Minerales ferromagnesianos. Incluyen biotita, piroxenos, anfíboles y olivino. En cuanto a los piroxenos, la Augita es el más común, aunque también son bastantes comunes la enstatita e hiperstena. De los anfíboles, la Hornblenda es el anfíbol más común. El olivino tiene menos sílice que los piroxenos o anfíboles, y solo aparecen en rocas básicas y ultrabásicas. La magnetita (Fe_3O_4), que es un mineral opaco, y la ilmenita (FeTiO_3) aparecen en pequeñas cantidades en las rocas volcánicas. La figura 4 muestra la proporción de los minerales comunes en las rocas volcánicas.

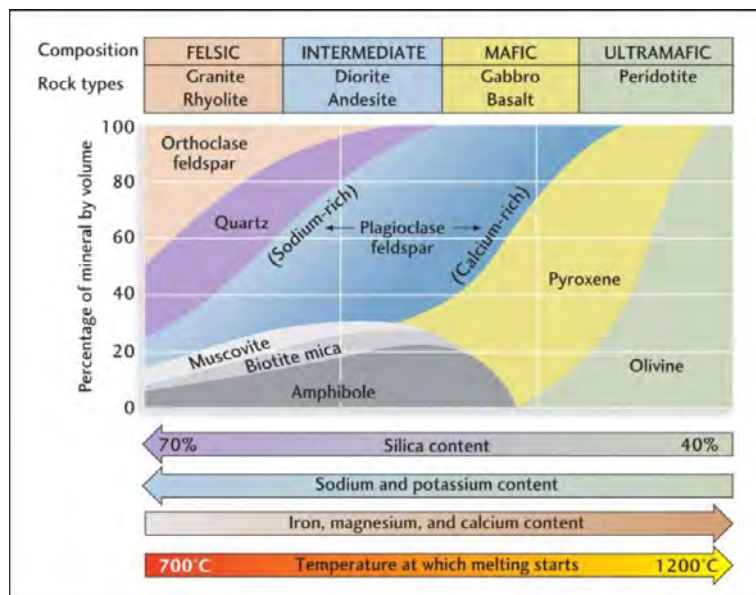


Fig.2.5: Contenido de minerales comunes en las Rocas Volcánicas.

Existen varios términos muy útiles para una primera aproximación sobre la composición mineralógica de las rocas volcánicas:

Félsica. Es un término que se deriva de la palabra feldespato y sílice, y hace referencia a aquellas rocas que contienen grandes proporciones de feldespatos con o sin cuarzo y/o sus polimorfos (tridimita y cristobalita). Un ejemplo de estas rocas es la riolita. Éste término también se emplea para referirse a rocas que contienen gran cantidad de feldespatoideos, tales como nefelina.

Máfica. Se deriva de las palabras magnesio y ferroso/férrico. Se refiere a la mayoría de las rocas formadas por biotita, anfíboles, piroxenos, olivino, y óxidos de Fe-Ti, así como también a rocas que contienen grandes proporciones de ellos como los basaltos.

Ultramáfica. Para rocas ricas en Mg y Fe. Estas rocas, generalmente, tienen pequeña o ninguna cantidad de feldespatos.

Para clasificar las rocas volcánicas se suele usar la clasificación propuesta por la IUGS (International Union of Geological Sciences), la cual es un estándar universal. Es una clasificación para rocas faneríticas, las cuales consisten sobre todo (>10% modal pero usualmente más) en minerales félsicos (Fig.2.6).

Las rocas volcánicas se pueden clasificar en función de su composición mineralógica mediante el diagrama QAPF, siempre y cuando se conozca la composición modal de la muestra. Si esto no es posible y si se tiene la composición química de la roca se utiliza el diagrama TAS para clasificarlas. Ambos diagramas se explicarán más

adelante.

El diagrama QAPF sólo es válido para rocas con minerales claros.

El diagrama de "STRECKEISEN" o "QAPF" es actualmente el diagrama más usado en la denominación de las rocas ígneas. El diagrama permite de una manera bastante fácil la denominación de rocas plutónicas y volcánicas. Solamente el contenido modal de 4 minerales en una muestra (y la textura) definen al final el nombre de la roca. Aquellas rocas cuyo contenido modal en cuarzo o feldespatoideos, feldespatos alcalinos y plagioclasas sea menor del 10% se tratan en otro tipo de diagrama.

Los cuatro parámetros del triángulo doble de Streckeisen son:

- Q = Cuarzo y otros minerales de SiO_2 .
- A = Feldespato alcalino (feldespato potásico incluido pertita y albita con menos de 5% del componente anortita, sanidina).
- P = Plagioclasas (An 5 a 100).
- F = Feldespatoideos: leucita, kalsilita, nefelina, sodalita, noseana, haüyna, cancrinita, analcima y los productos de transformación de estos minerales.

Los porcentajes de los componentes A, P, Q o F se determinan de la siguiente forma:

- 1) Se suman los componentes mineralógicos, los cuales se obtienen o bien de un análisis mineralógico.
- 2) Se recalculan los porcentajes al 100% para representarlos en el triángulo QAPF.

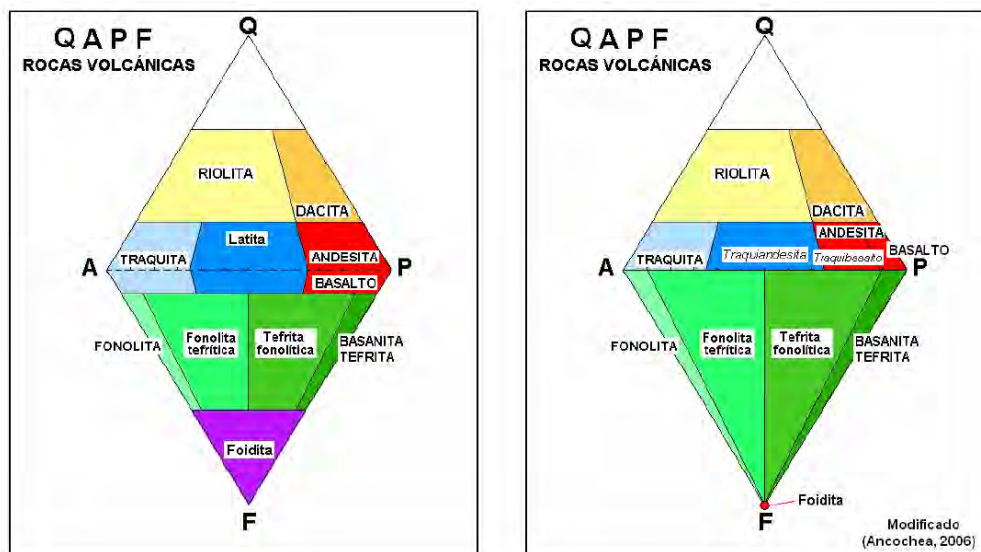


Fig.2.6: Clasificación de la IUGS de rocas volcánicas. Diagrama QAPF.

2.2.4 Clasificación basada en la composición química

Existen diversas clasificaciones en base a la composición química de la roca. A continuación se van a explicar cada una de las clasificaciones por separado.

2.2.4.1 Concentración Absoluta de Sílice:

Los magmas (y lavas) tienen una composición química variable; la variación más importante está en la cantidad de sílice que presentan, y en función de su contenido se pueden diferenciar cuatro tipos de rocas:

$>66\% \text{ SiO}_2$	Rocas Ácidas.
$52\% < \text{SiO}_2 < 66\%$	Rocas Intermedias.
$45\% < \text{SiO}_2 < 52\%$	Rocas Básicas.
$<45\% \text{ SiO}_2$	Rocas Ultrabásicas.

2.2.4.2 La composición normativa. Norma CIPW:

La norma fue desarrollada por primera vez por tres petrologistas y un químico, a principios del siglo XX, fue llamado Norma C.I.P.W (Siglas de los nombres de los científicos: Cross, Iddings, Pirsson, Washington), que se basa en calcular minerales normativos, (minerales típicos que se podría esperar que cristalizaran a partir de un magma anhidro fundido a baja presión).

La norma simplifica y organiza la composición química de una roca de una manera sutil y se hace hincapié en ciertas características químicas, especialmente la saturación de sílice.

A partir del análisis químico se puede reconstruir la composición mineralógica “ideal” de un magma suponiéndolo anhidro y a bajas presiones. Se trata de una clasificación no genérica, es únicamente descriptiva. El resultado obtenido se expresa en % en peso de minerales.

La norma proporciona los minerales ideales, sin tener en cuenta otros factores como la presencia de agua en las estructuras minerales, o alteraciones y reacciones posteriores que transforman los minerales primarios en otros secundarios. Además la norma únicamente calcula minerales puros, es decir, aquellos en los que existe solución sólida completa.

2.2.4.3 Saturación en Sílice:

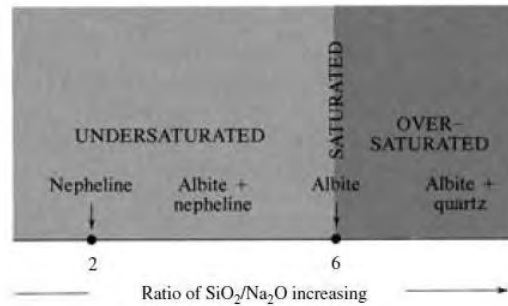


Fig.2.7: Grado de saturación en sílice en un sistema modélico consistente sólo de Si₂O, Al₂O₃, y Na₂O. (Myron G Best, 2003).

Según el contenido en minerales normativos las rocas se dividen en:

Rocas Sobresaturadas. Contienen cuarzo o sus polimorfos (cristobalita y tridimita).

Rocas saturadas. Contienen Hy (Hiperstena), pero no cuarzo, feldespatoides u olivino.

Rocas Sub-Saturadas. Rocas que contienen olivino y posiblemente nefelina.

2.2.4.4 Saturación en Aluminio:

El Al₂O₃ es el segundo constituyente más abundante en la mayoría de las rocas magmáticas, especialmente en las rocas félsicas.

El índice de saturación en aluminio es (Fig.2.8):

$$\frac{Al_2O_3}{(K_2O + Na_2O + CaO)}$$

Lo que equivale a 1 en feldespatos y feldespatoides.

Según este índice las rocas se clasifican en peralumínicas, metalumínicas y peralcalinas.

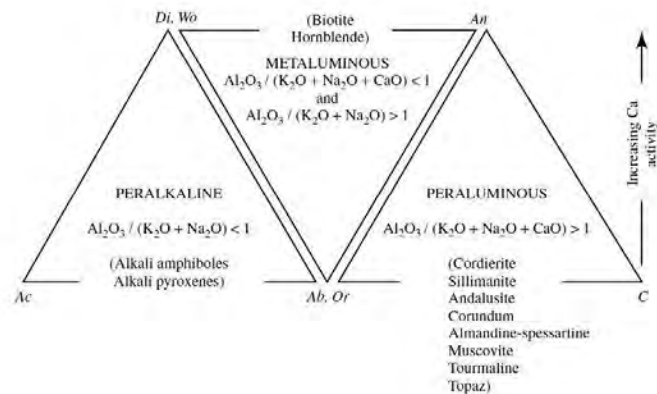


Fig.2.8: Clasificación de las rocas félsicas en base al grado de saturación en aluminio. (Myron G Best, 2003).

2.2.4.5 Diagrama TAS:

Las rocas volcánicas pueden ser clasificadas con el diagrama TAS “Total-Álcalis-versus-Sílice” (Fig.2.9). Se trata de un diagrama binario donde en el eje de abscisas se representa el porcentaje en peso de SiO_2 , y en las ordenadas la suma del porcentaje en peso de Na_2O y K_2O . Este diagrama ha sido subdividido en 15 campos con 17 nombres. Hay que tener en cuenta que la clasificación es puramente descriptiva sin implicaciones genéticas.

En este diagrama, además de obtener la denominación de la roca, es posible diferenciar entre rocas alcalinas y rocas subalcalinas.

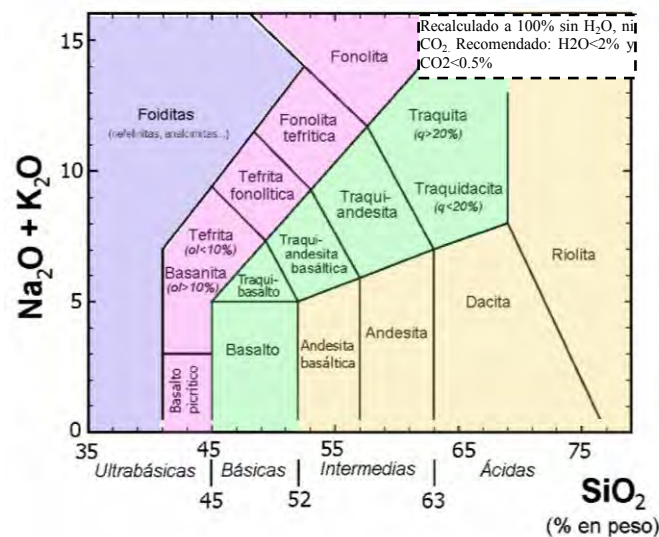


Fig.2.9: Diagrama TAS. En este diagrama también se observa la clasificación de las rocas según el contenido en SiO_2 en ultra-básicas, básicas, intermedias y ácidas. Le Maitre *et al.* (2002).

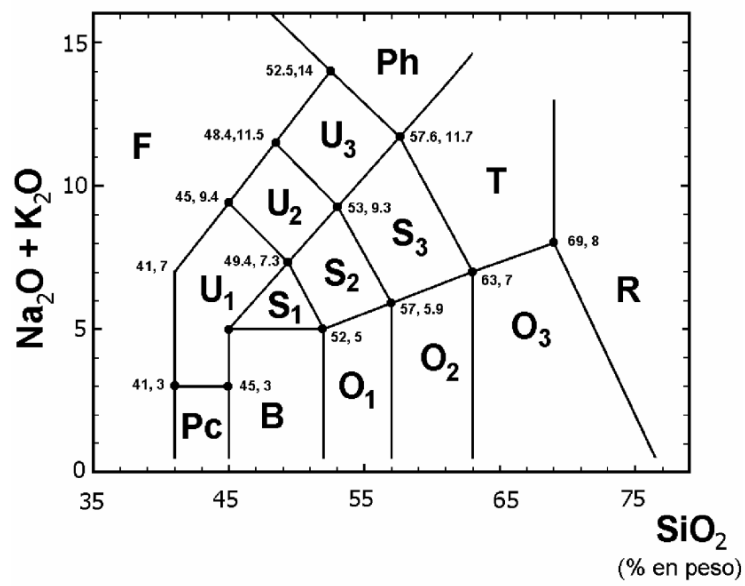


Fig.2.10: Diagrama TAS mostrando las rocas sobresaturada (O), las saturadas (S), las subsaturadas (U). Le Maitre *et al.* (2002).

2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MAGMAS

2.3.1 ¿Qué es un magma?

El termino magma fue introducido en la literatura geológica en 1825 por Scope, quien se refirió a este como un “compuesto líquido” que consiste en partículas sólidas suspendidas en un líquido, como un lodo.

La temperatura del magma cerca de la superficie de la Tierra generalmente está entre los 1200°C a 700°C; los valores altos pertenecen a los magmas de composición básica, mientras que los más bajos a los de composición silícea. Las densidades de los magmas están entre los 2.2 a 3.0 g/cm³.

El magma consiste en una mezcla movable de sólido, líquido y fase gaseosa. La naturaleza y número de las fases que constituyen un magma depende, bajo condiciones de equilibrio estable, de 3 variables: P (presión), T (temperatura) y X (concentración de componentes químicos en el magma). Los componentes químicos principales de los magmas, en general, son: SiO₂ > Al₂O₃ > FeO, Fe₂O₃ > MgO > CaO > Na₂O > K₂O [wt%]. A una temperatura suficientemente alta, cualquier roca se funde completamente para formar una solución líquida homogénea, o fundido. En la Tierra no suele haber fusión total, sino parcial. El líquido formado por esta fusión parcial se segrega y asciende como magma, dejando un residuo sólido.

La configuración de iones en un fundido (es decir, su estructura atómica) en gran medida determina muchas de sus propiedades significativas.

2.3.2 Propiedades físicas de los magmas

A continuación se analizan las siguientes propiedades físicas de los magmas:

- a) Temperatura.
- b) Densidad.
- c) Viscosidad.
- d) Volátiles.

a) Temperatura

Como ya se ha indicado, la temperatura de un magma varía entre 700°C y 1200°C. En general los magmas pobres en SiO₂ (magmas de composición básica) tienen temperaturas más bajas que los ricos en SiO₂ (magmas ácidos).

- Magma basáltico: 1000°C-1200°C.
- Magma andesíticos: 800°C-1000°C.
- Magma riolítico: 700°C-800°C.

Como puede verse en la Fig.2.11, la temperatura de fusión de un magma aumenta con la profundidad. Además como se verá más adelante, la temperatura también influye en la viscosidad de los mismos.

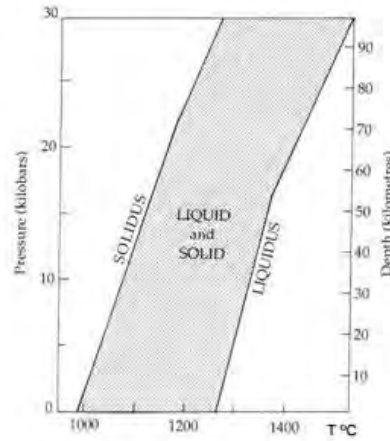


Fig.2.11: Influencia de la Temperatura.

b) Densidad

La densidad es la relación Masa/Volumen (kg/m^3). Es una función que depende de: la temperatura, la presión y la composición del magma.

La densidad disminuye ligeramente con la temperatura (Fig.2.12), y aumenta con la disminución SiO_2 .

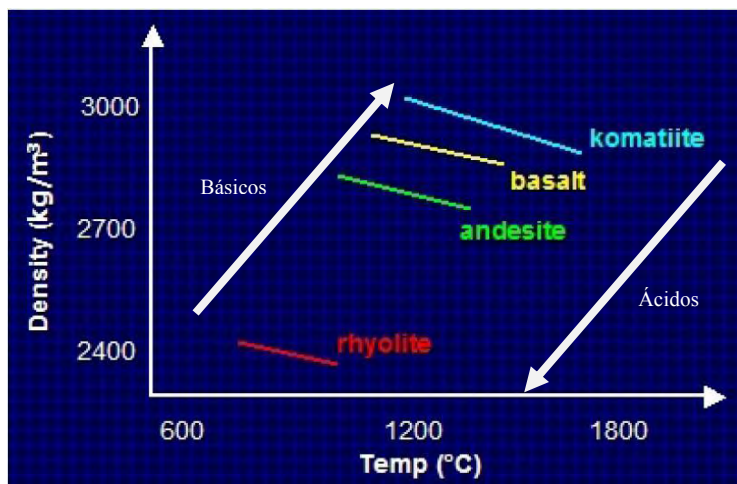


Fig.2.12: Gráfica que muestra la relación entre la Densidad, Temperatura y Composición de los magmas.

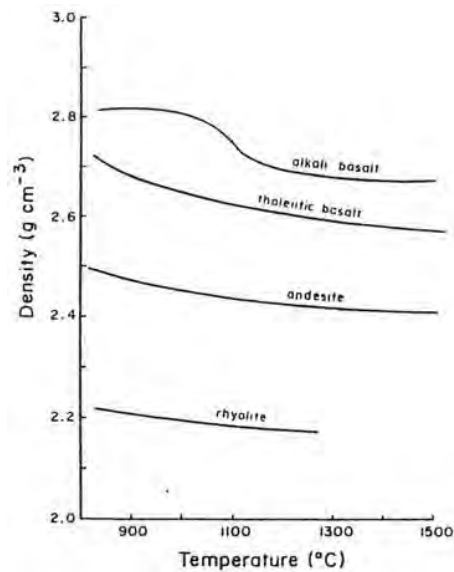


Fig.2.13: Densidad de algunos fundidos de rocas volcánicas con la variación de la temperatura a presión atmosférica (después de Murase & McBirney 1973).

c) Viscosidad

La viscosidad es la resistencia a fluir ante el esfuerzo, y se mide en Pa.sg = 1 poise. Esta propiedad de los magmas depende fundamentalmente de los siguientes parámetros:

- Presión.
- Temperatura.
- Composición química de los magmas; en particular de la cantidad de óxidos de sílice (SiO₂).

A continuación se resume cómo influyen cada uno de estos factores.

1. Composición química del magma: es el factor que más influye (Fig.2.14).

Como ya se ha indicado, la viscosidad de un magma está directamente relacionada con su contenido en sílice. En general, cuanto más sílice tenga un magma, mayor será su viscosidad. El flujo magmático se ve impedido porque las estructuras de sílice se enlazan formando largas cadenas incluso antes de que empiece la cristalización. Por consiguiente, debido a su elevado contenido en sílice, las lavas félsicas son muy viscosas y tienden a formar coladas gruesas, comparativamente cortas. Por el contrario, las lavas máficas, que contienen menos sílice, tienden a ser bastante fluidas.

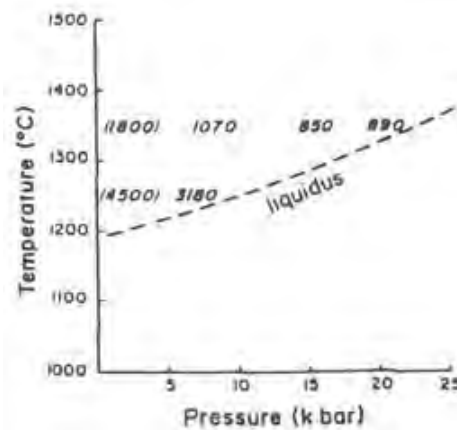


Fig.2.14: Viscosidad de un fundido andesítico con la variación de la Temperatura y Presión. Los números indican la viscosidad del fundido en poises. Los que están en paréntesis representan la viscosidad del mismo fundido a 1 atm de presión calculada por el método de Bottinga y Weill (1972) (After Kushiro et al.).

2. Temperatura: cuanto mayor es la temperatura menor es la viscosidad. La movilidad de la lava está muy influenciada por la temperatura. Conforme la lava se enfría y empieza a congelarse, su movilidad disminuye y el flujo acaba por detenerse (Fig.2.15).

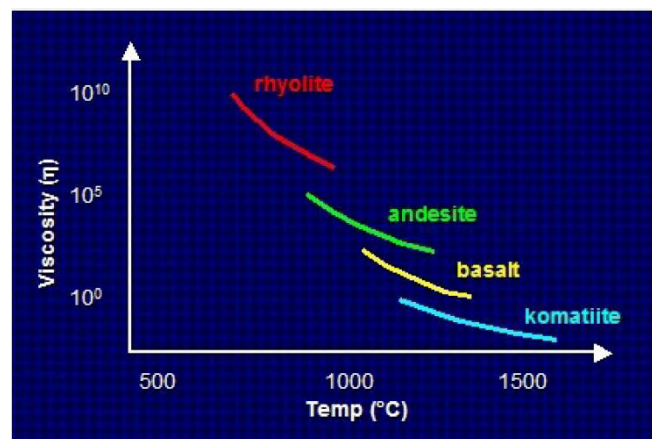


Fig.2.15: Relación entre la temperatura y la viscosidad. A menor temperatura mayor viscosidad.

3. Presión:

La relación entre la presión y la viscosidad se muestra en la Fig.2.16, donde se observa como a medida que aumenta la presión disminuye la viscosidad.

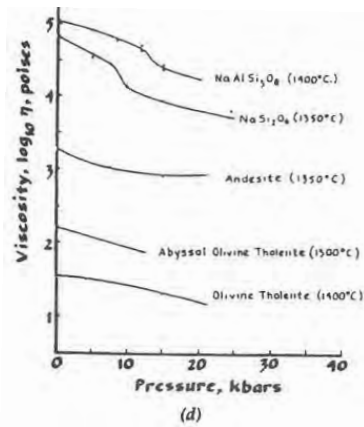


Fig.2.16: Relación entre la presión y la viscosidad. Un aumento en la presión se traduce en una disminución de la viscosidad.

4. Contenido en agua:

Los volátiles (ej. H₂O) son elementos modificadores de redes cristalinas, rompiendo los enlaces y las redes de poliedros.

La viscosidad es inversamente proporcional al contenido de volátiles, es decir, a una misma temperatura la viscosidad disminuye con el aumento de volátiles disueltos (Fig.2.17).

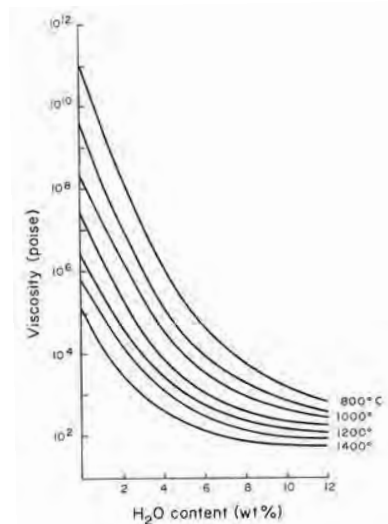


Fig.2.17. Relación entre el contenido de volátiles y la viscosidad.

En resumen, a igual presión, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura (más caliente = más fluido). A igualdad de temperatura, la viscosidad disminuye con la presión (más comprimido = magmas menos fluidos). Ahora bien, si la presión y la

temperatura son iguales, la viscosidad viene regulada por la concentración de compuestos volátiles que rompen las cadenas de silicatos. En el último caso, además de los gases, también influye la concentración de Si y Al (a mayor concentración, más viscosidad).

d) Volátiles

El contenido en volátiles condiciona el grado de explosividad de una erupción volcánica. Incluso pequeñas cantidades de volátiles, por lo general agua, influye fuertemente en el comportamiento magmático.

Naturaleza de los volátiles:

Los volátiles son especies químicas que a presiones cercanas a la atmosférica, pero a altas temperaturas del fundido, existen como un gas o vapor. Incluyen H_2O , CO_2 , HCl , N_2 , HF , F , Cl , SO_2 , H_2S , CO , CH_4 , O_2 , NH_3 , S_2 , y gases nobles como He y el Ar. Muchos volátiles consisten en sólo 6 elementos de bajo peso atómico (H, C, O, S, Cl y F).

Al aumentar la presión de confinamiento, las moléculas del gas, inicialmente dispersas, son forzadas a acercarse entre ellas, aumentando así su densidad y alterando otras propiedades, tales como su capacidad para llevar otros elementos químicos en solución: Si, Fe, Hg, y así sucesivamente. Por encima del punto crítico, los estados líquidos y gaseosos (vapor) ya no son claramente distinguibles.

A profundidades de más de un kilómetro ya no hay ninguna distinción familiar entre el agua líquida y la gaseosa o el dióxido de carbono líquido y gaseoso, y cada uno es un fluido.

A profundidades de más de unos pocos kilómetros y en un amplio rango de presión y temperatura el agua tiene una densidad cercana a la densidad del agua superficial en lagos y ríos (1 g/cm^3).

Solubilidad de los volátiles en un fundido silicatado:

La solubilidad de los volátiles depende de la presión, temperatura y de la composición química del magma.

Los cambios en la temperatura y presión tienen efectos opuestos en la solubilidad de los volátiles, pero el efecto de la presión es el dominante (en las lavas básicas, más calientes, el fundido tiene menos volátiles disueltos).

Para el caso del agua, la Fig.2.18 muestra el importante aumento de la solubilidad del agua con respecto al aumento de la presión. Sobre una base porcentual de peso, la solubilidad del agua en fundidos silíceos es ligeramente mayor que en fundidos máficos. La curva de solubilidad (Fig.2.18) indica la cantidad máxima de agua que

puede estar contenida dentro del fundido indicado, a una presión y temperatura particular. La curva puede ser también considerada como curva de saturación, de tal forma que un fundido que contiene una concentración menor de agua disuelta que el valor de solubilidad a una P particular está sub-saturado en agua. Por otro lado, un fundido que contiene un exceso de concentración está saturado en agua y el sistema magmático consta de ese fundido saturado más una fase separada de fluido de agua.

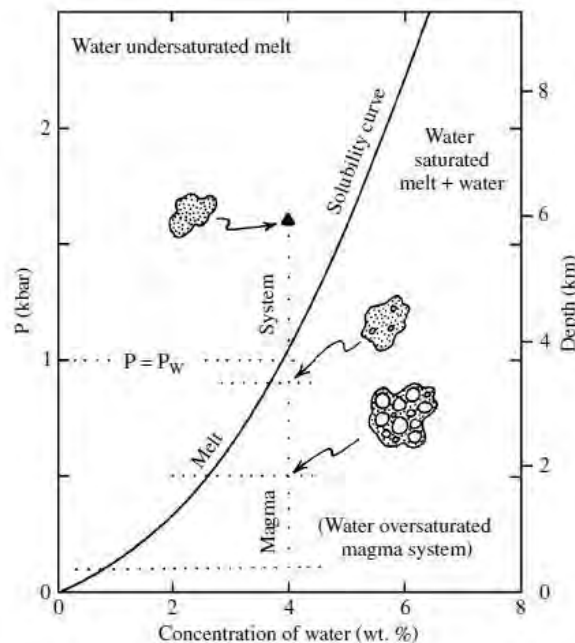


Fig.2.18. Evolución de un sistema de magma hipotético durante la descompresión de un estado inicial sub-saturado en agua. El magma inicial es un fundido libre de burbujas y cristales a 1.6 kbar, correspondiente a una profundidad de 6 km, y contiene 4 wt.% de agua disuelta sin otros volátiles. (Best, M. G; 2003).

Exsolución de los volátiles:

A medida que los magmas suben desde el manto superior o desde la parte baja de la corteza se elevan hasta profundidades someras y se enfrían y el fundido puede llegar a saturarse. Una vez saturado, el exceso de los volátiles se separa de la mezcla y forma una fase de fluido distinta que coexiste en el proceso; a este proceso se le denomina exsolución.

Hay dos procesos ideales finales que comprenden el espectro de la situación, usaremos el agua como único volátil para ilustrar estos dos procesos:

- Una mezcla volátil no saturada que asciende y se descomprime puede saturarse en la medida en que la presión decrece exudando o soltando fluido.
- Un magma estático e isobárico y que es inicialmente volátil y no saturado

pero perdiendo calor a sus alrededores y enfriándose puede convertirse en saturado en agua mediante la cristalización de minerales tales como olivinos, piroxenos y feldespatos. Como estos minerales anhídridos cristalizan, la concentración de agua en el fundido residual se incrementa; en estos casos se lleva a una saturación, y a esto se le denomina la segunda exsolución.

La exsolución de los volátiles desde un fundido en un proceso exotérmico, causa enfriamiento de la misma manera que la evaporación de agua líquida causa enfriamiento.

Resumiendo:

1. El magma admite más volátiles cuanto mayor es la presión.
2. Cuanto mayor es la temperatura del magma, menos volátiles admite en disolución, por lo que hay más burbujas.
3. Los gases disueltos tienden a incrementar la fluidez del magma.
4. Los magmas basálticos, muy fluidos, permiten que los gases en expansión migren hacia arriba y escapen por la chimenea con relativa facilidad, produciendo fuentes de lavas.
5. Los magmas más viscosos expulsan de manera explosiva chorros de gases calientes cargados de cenizas que forman nubes verticales con gran fuerza ascensional que se extienden a miles de metros en la atmósfera.

2.4 PROCESO ERUPTIVO Y TIPOS DE ERUPCIONES

2.4.1 Proceso eruptivo

El magma asciende por diferencia de presiones con la roca encajante. Este ascenso se realiza a través de fracturas en la corteza terrestre hasta profundidades donde la presión magmática iguala a la presión confinante, para formar allí cámaras magmáticas. La facilidad con la que se produce este ascenso está en función de la viscosidad del magma, la que a su vez depende, como se ha indicado anteriormente, de la composición química, contenido de volátiles, presión, temperatura, contenido de cristales y contenido de burbujas (Cas y Wright, 1987).

En el ascenso del fundido a lo largo del conducto, la presión de su entorno disminuye, dando lugar a que eventualmente se alcance la presión de saturación de los gases disueltos y, por tanto, comience a formarse burbujas de gas.

El nivel a partir del cual se alcanza la presión de saturación y se empiezan a formar burbujas de gas se conoce como nivel de exsolución. El nivel de exsolución será distinto para cada especie volátil y su posición dependerá de la cantidad de gas que tenga cada magma.

Justo por encima del nivel de exsolución, el magma se comporta como un flujo trifásico compuesto por un líquido saturado en volátiles, cristales sólidos en suspensión y pequeñas burbujas de gas de escala microscópica a milimétrica. Este tipo de flujo se conoce con el nombre de régimen de flujo burbujeante (*bubbly flow regime*). Una vez formadas, las burbujas de gas tienden a crecer durante el ascenso del magma por el conducto volcánico. Este crecimiento se puede dar por causas muy variadas, entre las que destacan el crecimiento por difusión (moléculas de volátiles emigran del líquido hacia las burbujas), el crecimiento por descompresión (las burbujas se expanden debido al ascenso de la mezcla hacia zonas de menor presión) y el crecimiento por agrupamiento (varias burbujas pequeñas vencen la tensión superficial y se juntan formando otras mayores).

Lo que ocurra en las partes altas del conducto (a niveles de poca presión) dependerá de cada tipo de magma y caracterizará el tipo de erupción. Así, en magmas muy viscosos (como son los magmas ricos en sílice) las burbujas no pueden migrar lo suficiente como para alcanzar la superficie y por tanto se acumulan en el conducto de salida, formando una especie de espuma relativamente uniforme. Cuando el volumen ocupado por las burbujas supera aproximadamente un 75%, la presión diferencial en la interfase magma/atmósfera aumenta hasta tal punto que se produce una erupción explosiva, en la que el gas es emitido hacia la atmósfera a una velocidad elevada, arrastrando una gran cantidad de partículas sólidas vesiculadas, que pueden pasar a formar parte de la columna eruptiva. La profundidad a la que se produce la

disrupción de un fundido magmático vesiculado, más o menos frágil, se denomina nivel de fragmentación (Fig.2.19).

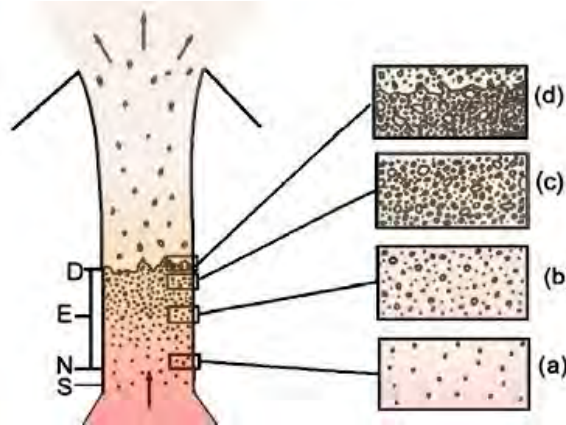


Fig.2.19: Perfil esquemático del conducto de un volcán, donde S es el nivel de saturación de gas, N es el nivel de nucleación, E es el intervalo de crecimiento y exsolución de las burbujas y D es el nivel de disrupción del magma. Los recuadros a-d representan las distintas etapas en la evolución de una burbuja (Sparks, 1978).

En el caso de magmas basálticos donde la viscosidad es menor, la desgasificación es permanente a medida que las burbujas van llegando a la superficie, dando lugar a erupciones no explosivas donde la energía liberada es casi constante.

2.4.2 Tipos de erupciones

2.4.2.1 Clasificación del tipo de erupción basado en las características de los depósitos de caída y el modo de fragmentación del magma

La clasificación de las erupciones volcánicas de sistemas volcánicos modernos esta comúnmente basada en los depósitos de piroclastos de caída generados por una erupción volcánica (Walker, 1973). En este esquema de clasificación se tiene en cuenta: la dispersión y el grado de fragmentación del magma (Walker, 1973).

El grado de fragmentación del magma está estrechamente relacionado con el tamaño de partícula de los productos eruptivos (el tamaño de grano es más fino cuanto mayor es la fragmentación). Una relación causal también existe entre la altura de la columna eruptiva y el grado de fragmentación (Walker, 1973); cuanto mayor es la columna eruptiva mayor es la fragmentación. Por otro lado, cuanto mayor es la columna eruptiva, mayor es la dispersión de los depósitos piroclásticos de caída. Esta relación se expresa en una serie de diagramas empíricos (Fig.2.20). Sobre estos diagramas, se han identificado los tipos de erupciones, la mayoría de ellos referidos a alguna

erupción histórica, de la que toma el nombre de la localidad donde se describió por primera vez el tipo de erupción. Estos estilos de erupción fueron descritos en: Estrómboli (Estromboliana) y Vulcano (Vulcaniana) en las Islas Eolias en Italia; Hawai (Hawaiana), Vesubio (Pliniana) y Surtsey (Islandia) (Surtseyana) y Mt. Peleé (Peleana)

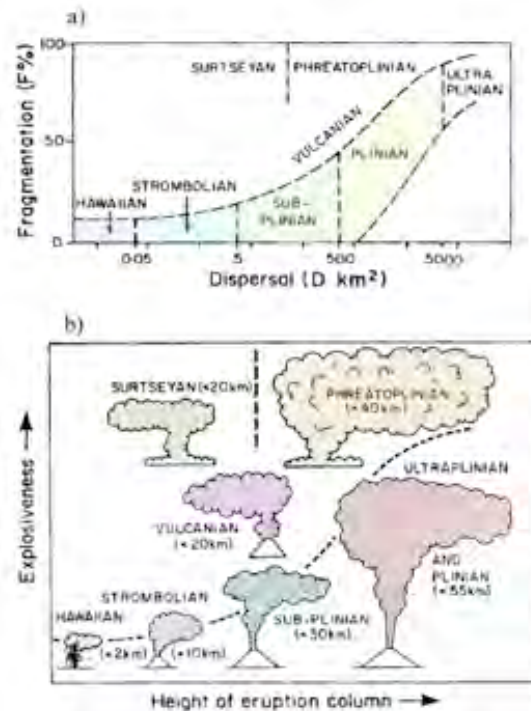


Fig.2.20. a) Diagrama de Dispersión (D) y Fragmentación (F), mostrando los diferentes tipos de erupciones después del esquema de clasificación de Walker 1973. b) un diagrama resumen explicando las diferencias entre varios tipos de erupciones volcánicas. Diagrama redibujado después de Cas y Wright 1988: p.130.

La categorización de los tipos de erupción genera grandes problemas en la interpretación de los depósitos antiguos. En el registro de las rocas piroclásticas más antiguas, especialmente en aquellas que representan las facies distales acumuladas en cuencas sedimentarias, los estratos piroclásticos a menudo representan secciones condensadas, que comprenden una serie de tipos eruptivos diferentes durante un periodo de tiempo relativamente corto en la historia relativa del mismo volcán. Además, los tipos eruptivos son fenómenos dependientes del tiempo. Por tanto, la interpretación de depósitos piroclásticos antiguos necesita un análisis muy cuidadoso de las facies sedimentológicas, a fin de establecer el marco de tiempo en el que se emplazó la sucesión.

2.4.2.2 Rasgos característicos de los tipos de erupciones

Erupciones de tipo Hawaiano y Estromboliano:

En una erupción hawaiana/estromboliana normal el magma basáltico, relativamente fluido, forma generalmente conos de escorias o *Spatter cones* (Fig.2.21). El grado de fragmentación de los piroclastos es bajo y el área de dispersión limitada, debido a que la altura de la columna eruptiva no supera los 300 m. El volcanismo hawaiano es basáltico efusivo, por lo tanto débilmente explosivo, y da lugar a depósitos piroclásticos con un valor de D (Fig.2.20) menor a 0.05 Km^2 , mientras que la actividad estromboliana produce depósitos piroclásticos con un D mayor a 0.05 Km^2 . Las erupciones hawaianas generan altas proporciones de escorias.



Fig.2.21: Conos de escorias.

Las erupciones estrombolianas son más explosivas que las hawaianas, en ellas se producen una mayor proporción de fragmentos o rocas piroclásticas, aunque el magma sigue siendo basáltico. La actividad puede ser rítmica o continua, y los fragmentos de lava incandescente, que al enfriarse forman escorias, son arrojados del cráter. Los depósitos volcánicos consisten en una alternancia de lava y piroclastos.

La causa de las explosiones estrombolianas es la aproximación hacia la superficie de una o más burbujas de gas, mientras el magma permanece en reposo (Fig.2.22). El proceso de cada explosión corresponde a la evolución de una burbuja y al mecanismo se lo considera como una expansión adiabática. La presión de las burbujas que llegan a la superficie del magma y su ascensión a través del líquido dependen de las propiedades físicas del magma, y por ello las erupciones estrombolianas se dan en magmas poco viscosos, en los cuales las burbujas pueden ascender con relativa rapidez. Los productos piroclásticos generados en estas erupciones corresponden a bombas, lapilli y cenizas, los cuales forman depósitos de caída con una dispersión muy pequeña.

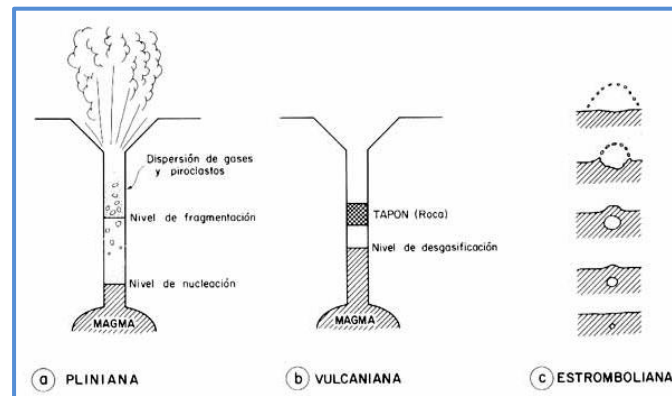


Fig.2.22: Tipos de erupciones explosivas (Wilson, 1980, Martí, J, 1989).

Erupciones tipo Vulcaniano:

Este tipo de erupción comienza con una gran explosión que elimina el tapón de lava solidificada que obstruye el conducto volcánico (Fig.2.22) (Self et al. 1979; Woods 1995; Clarke et al. 2002). Esta destrucción se debe a un incremento de la presión interna del sistema magmático. El resultado de dicha explosión es una columna eruptiva que colapsa rápidamente, debido a la alta densidad de sus componentes, así como al bajo contenido en gases que caracteriza este tipo de erupción.

Estas erupciones están comúnmente acompañadas de oleadas piroclásticas (*Pyroclastic surge*) y flujos piroclásticos menores (*Pyroclastic flow*) como se ha documentado a partir de Asama en Japón (Yasui y Koyaguchi 2004) y en Colima en México (Saucedo et al. 2005). Después de la erupción piroclástica, tiene lugar la emisión de lava. Las erupciones Vulcanianas están asociadas con Hawaianas, Estrombolianas o Sub-Plinianas.

Erupciones tipo Pliniano:

Se trata de una erupción altamente explosiva donde se forman altas nubes eruptivas (decenas de kilómetros) y la tefra de caída está muy extendida (Fig.2.23). El perfil de dispersión de la tefra depende mucho de la dirección principal del viento y el patrón de caída puede ser muy asimétrico. Las erupciones plinianas son ricas en volátiles y con magmas altamente viscosos como dacita-riolitas, aunque también andesitas o incluso erupciones basálticas se sabe que han producido erupciones plinianas.

Las erupciones sub-plinianas son aquellas, usualmente, producidas por vulcanismo explosivo más máfico y en la dispersión de la tefra de caída es menor que las del tipo pliniano, sin embargo, el nivel de fragmentación del magma quizás es tan amplio como otros magmas silíceos.

Las velocidades eruptivas son de unos cientos de metros por segundo y las

erupciones pueden durar días o semanas. Durante la erupción, sin embargo, periodos intermitentes pueden producir otros depósitos de tefra, a menudo de menor extensión.

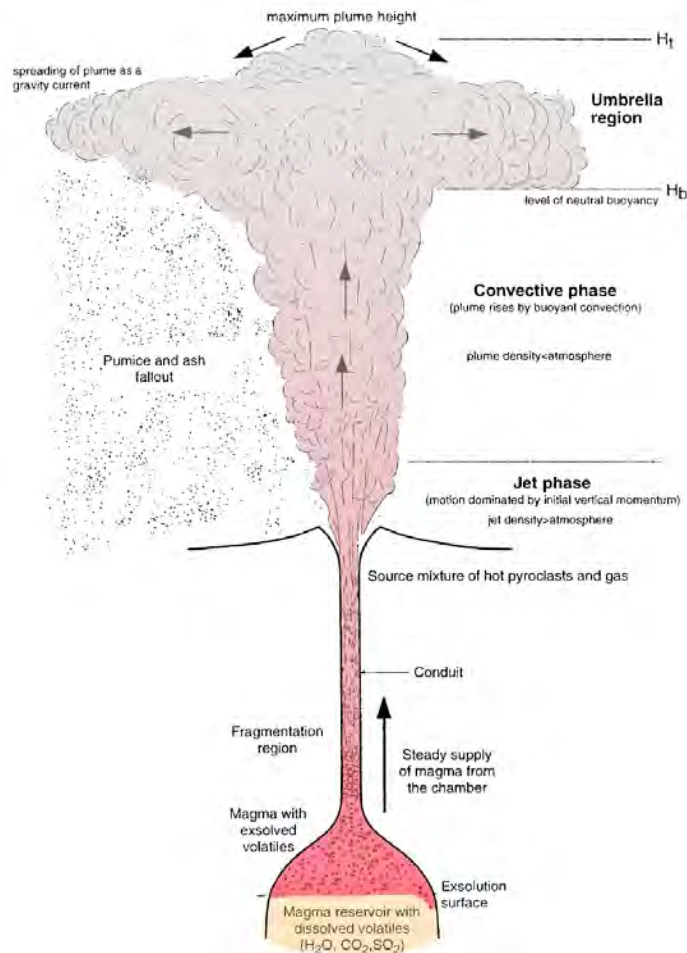


Fig.2.23: Partes de una pluma volcánica generada por una erupción magmática rica en sílice (según Carey y Bursik 2000: p.529, fig.1).

Erupciones estilo Surtseyano/Freatomagmático:

Cuando una erupción tiene lugar en contacto con el agua (mar, lago, agua meteórica, etc.) se produce un tipo especial de vulcanismo, más explosivo que el estromboliano. Este vulcanismo posee los máximos valores de fragmentación, cercanos al 100%, producto de la interacción magma-agua (Cas y Wright, 1987). La columna eruptiva puede alcanzar varios kilómetros de altura y por lo tanto tiene un alto grado de dispersión. Los depósitos resultante son anillos de cenizas y capas de cenizas alrededor del conducto o viento abajo (Walker, 1973). La diferencia entre ambos está dado por el grado de dispersión (D). En los depósitos surtseyanos la dispersión es moderada, mientras que en los freatomagmáticas puede ser más amplia.

2.5 MATERIALES EXPULSADOS DURANTE UNA ERUPCIÓN

2.5.1 Flujos o coladas de lava

Los materiales volcánicos más característicos de las erupciones efusivas son las coladas de lava. La morfología de las lavas depende de su viscosidad, del volumen de material emitido, de la pendiente topográfica del edificio volcánico y del medio en que se emplazan. Las lavas básicas, como, por ejemplo, los basaltos, son muy fluidas y pueden dar lugar a coladas de gran extensión. Un ejemplo de estas son las producidas en las erupciones Hawaianas; estas erupciones dan lugar a coladas Pahoehoe, que son coladas poco viscosas, que se mueven con facilidad y rapidez. El contacto de la lava con el aire hace que se forme una película que se deforma de manera plástica.

Cuando la lava (generalmente basáltica) discurre hasta detenerse muy caliente (1000°C) y fluida, presenta una superficie lisa que ocasionalmente está arrugada o plegada (Lavas Cordadas, Fig.2.24). Estos pliegues o arrugas son perpendiculares a la dirección del flujo y se originan por la existencia de pequeñas turbulencias en el interior de la colada. En otros casos la superficie de la colada es áspera e irregular (Lavas aa, Fig.2.24) y está constituida por pequeños bloques que se forman debido a una fragmentación continua de la corteza superficial ya enfriada pero todavía en movimiento. Cuando los fragmentos son de gran tamaño se denominan coladas en bloques.



Fig.2.24: De izquierda a derecha, Lava aa y Lava Pahoehoe o Cordada.

Como mera observación, una colada puede presentar en un tramo inicial una superficie lisa, seguida por un tramo con morfología de lava cordada que progresivamente se hace más irregular hasta convertirse en un verdadero malpaís.

Por el contrario, las lavas derivadas de magmas ácidos, como, por ejemplo, las dacitas y riolitas, son muy viscosas y normalmente se acumulan sobre la misma boca

eruptiva dando lugar a domos (Fig.2.25), y en casos extremos, en que extruyen prácticamente solidificadas, a pitones(Fig.2.25).



Fig.2.25: Izq.: Domos de lava en el cráter del monte Santa Helena. Drcha.: Pitón volcánico de Cancarix.

Durante su enfriamiento las lavas experimentan una fuerte contracción y se crea un sistema de fracturas que, cuando el enfriamiento es lento, se disponen perpendicularmente al techo de la colada, dando lugar a una típica disyunción columnar (Fig.2.26). Cuando el enfriamiento es rápido estas fracturas se disponen paralelamente a la base produciendo una disyunción en lajas. Otro tipo de disyunción característica de las coladas de lava es la disyunción en bolas (Fig.2.26), la cual se produce por una infiltración lenta de la humedad a través de las grietas de retracción, de forma que se produce una progresiva escamación esferoidal.



Fig.2.26: Izq.: Disyunción columnar. Drcha.: Disyunción en bolas o esferoidal (Las Palmas, Islas Canarias).

Las coladas de lavas submarinas cuando entran en contacto con el agua forman una delgada capa vítrea, más o menos plástica, que envuelve al material fundido. Si continúa fluyendo el magma desde el centro emisor, esto provoca un empuje en la

colada que ocasiona la separación, en el frente de la misma, de unas bolas que ruedan por la pendiente topográfica, dando lugar a unas acumulaciones que se conocen como lavas almohadilladas (Fig.2.27).



Fig.2.27: Lavas almohadilladas.

2.5.2 Depósitos de piroclastos

Los depósitos piroclásticos son producidos por la fragmentación del magma y de la roca encajante durante las erupciones explosivas. Dentro de estos depósitos podemos encontrar tres tipos de componentes: fragmentos de magma y de cristales (fragmentos esenciales o juveniles), y fragmentos líticos derivados de las paredes del conducto (fragmentos accidentales) o de partes solidificadas del magma (fragmentos accesorios).

Los piroclastos pueden formar acumulaciones muy diversas según sean los mecanismos de transporte y deposición. En la actualidad se aceptan tres tipos principales de mecanismos genéticos y de transporte, denominados piroclastos de caída (*pyroclastic fall*), coladas piroclásticas (*pyroclastic flow*) y oleadas piroclásticas (*pyroclastic surge*). En los primeros, los piroclastos caen directamente al suelo describiendo una trayectoria balística o después de que la columna eruptiva se haya expandido formando una nube de cenizas que se desplaza lateralmente controlada por los vientos. En las coladas piroclásticas los fragmentos son transportados a ras del suelo dentro de un flujo de alta densidad que se desplaza a elevada temperatura y en el cual la fase continua entre las partículas es gas, siendo la relación gas/fragmentos baja. En el tercer tipo, los piroclastos son transportados lateralmente y a ras del suelo dentro de un flujo turbulento donde la relación gas/fragmentos es elevada. Asimismo, existen otros tipos de depósitos piroclásticos, como es el caso de los lahares y otros depósitos volcanoclásticos, que se han originado indirectamente a través de un proceso volcánico y que poseen características mixtas entre los depósitos sedimentarios y los propiamente piroclásticos.

2.5.3 Mecanismo de formación. Columna Eruptiva

Uno de los aspectos más característicos de la mayoría de las erupciones explosivas es la formación de una columna eruptiva vertical formada por una mezcla de gases y piroclastos. El mecanismo que controla la formación de la columna eruptiva es la expansión del vapor de agua, inicialmente sometido a altas presiones y temperaturas, hasta condiciones atmosféricas. Existen diferentes tipos de plumas volcánicas. Aquellas que están producidas por erupciones hidromagmáticas se muestran en la Fig.2.28. Otros tipos de plumas, las cuales dependen del contenido de agua del magma y del diámetro de la chimenea, se muestran en la Fig.2.29.

Dentro de la columna eruptiva se pueden diferenciar tres fases (Fig.2.29): zona de chorro (Gas thrust región), zona convectiva (Convective región) y zona de difusión horizontal (Umbrella región).

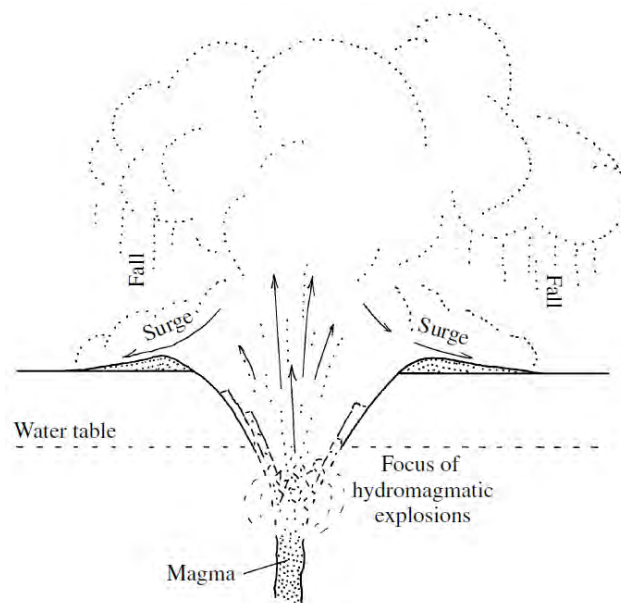


Fig.2.28: Esquema de una sección transversal a través de un sistema de explosión Hidromagmática. El foco de la explosión es el área por donde la columna de magma ascendente en contacto con el agua externa. Las Oleadas Piroclásticas y los depósitos de caída, incluyendo los clastos balísticos, construyen un pequeño anillo de toba alrededor del profundo cráter de maar, (Myron G Best, 2003).

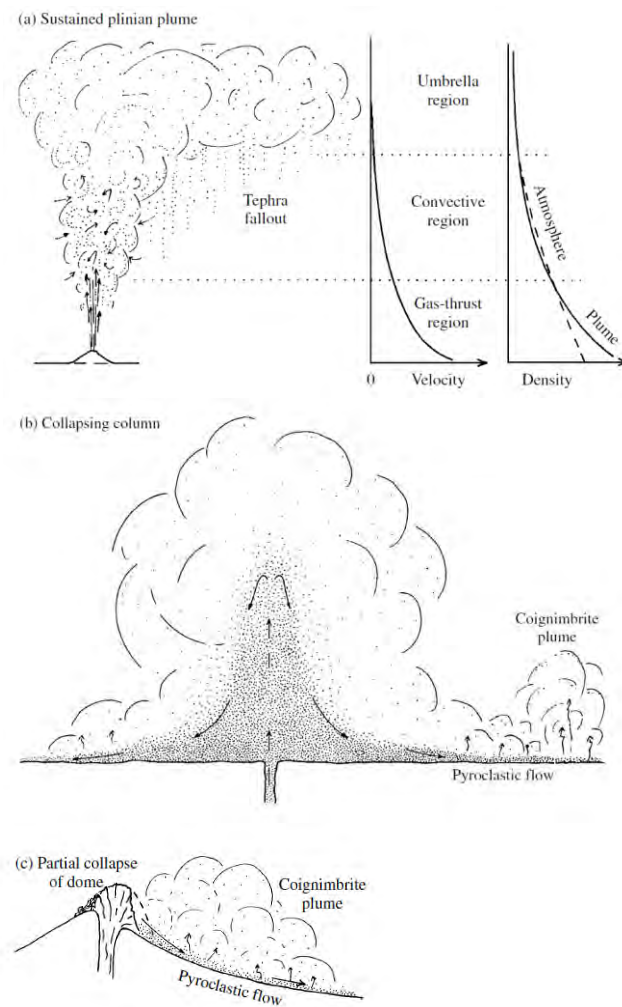


Fig.2.29: Tipos de Plumas Volcánicas. Los tres diagramas no están a la misma escala. (a) La pluma plineana convectiva sostenida muestra tres régimen dinámico y su relación con la altura de la columna, velocidad, y densidad de la pluma y la atmósfera. (Ver Sparks, 1997). En la zona de chorro, el fluido volátil en expansión separado del magma imparte a la pluma un momento dirigido hacia arriba. En la zona convectiva, la energía térmica contenida en la zona turbulenta de la pluma calienta el aire atmosférico decreciendo la densidad de la pluma, haciéndola menor que la de la atmósfera circundante y le imparte el empuje de sustentación. En la región de difusión, la densidad de la pluma en expansión y convección se iguala a la densidad de la atmósfera por lo tanto la pluma en sustentación neutra se expande horizontalmente. Sin embargo, el empuje hacia arriba de la pluma en el régimen convectivo causa que sobrepase el nivel de sustentación neutral de tal manera que la región de difusión puede tener un espesor importante. Aunque la altura total de la pluma está en función principalmente con la razón de expulsión del magma correlacionada con el radio de la chimenea, otros factores tales como la temperatura atmosférica T , la humedad y la velocidad del viento también influye en la altura de la pluma. Los depósitos de ash-fall se forman por la caída desde la pluma de cientos a miles de Km de la chimenea. (b) una columna en colapso se forma si el momento de sustentación de la pluma es incapaz de elevarla más de unos poco kilómetros. La masa de la eyecta es demasiado grande para ser elevado por la fuerza de sustentación y consecuentemente los piroclastos caen al suelo, donde la energía cinética ganada durante el proceso de caída los envía lejos del foco emisor como coladas piroclásticas. Sin embargo, una pluma supra-yacente en sustentación por convección está formada por una mezcla de aire atmosférico con piroclastos finos en la parte externa de la pluma. Una pluma coignimbrita se desarrolla encima de la colada piroclástica. (c) el colapso de una parte de un domo peleano produce una pequeña colada piroclástica de bloques y cenizas; en esta figura se observa una pluma coignimbrita sobre ella. (Myron G Best, 2003).

La zona de chorro (*Gas thrust region*) corresponde a la parte basal de la columna; está dominada por la energía cinética y se rige por las leyes de la balística, a la vez que se caracteriza por grandes velocidades (incluso supersónicas) y desaceleraciones. Dentro del conducto y en la boca de salida la expansión de los gases acelera la mezcla de gases y piroclastos a grandes velocidades, hasta alcanzar un máximo (velocidad de salida) que puede ser considerado como la condición de velocidad en la base de la columna. La velocidad de salida depende de la presión de la explosión en el nivel de fragmentación del magma, la cual depende, a su vez, del contenido en gases del magma (Wilson et al., 1980).

La zona de chorro ocupa tan sólo una pequeña fracción de la altura total de la columna, desde pocos centenares de metros hasta algunos kilómetros en las erupciones más importantes. Tal como se muestra en la Fig.2.29, el flujo se caracteriza por una rápida desaceleración y por una reducción de la densidad global de la columna. La zona de chorro pasa hacia una zona mucho más convectiva, caracterizada por la disipación de la energía térmica, siendo su desarrollo mayor cuanto mayor sea la eficacia en la transferencia de calor; el movimiento corresponde al ascenso convectivo de una masa de gas (Araña y Ortiz, 1984). El techo de la zona convectiva se define por un nivel de densidad neutra donde la columna eruptiva tiene la misma densidad y temperatura que la atmósfera que la envuelve (Sparks, 1986). Por encima de este nivel la columna sigue ascendiendo debido a su impulso, hasta que alcanza una altura determinada en la que se expande horizontalmente formando la zona de difusión horizontal, la cual queda sometida a la interacción con los vientos dominantes de la alta atmósfera.

De esta forma, el ascenso de una columna eruptiva de gases y piroclastos está controlado por su interacción con las masas de aire que la envuelven. Inicialmente, la temperatura de la columna es muy superior a la ambiental, lo que hace que ascienda con una velocidad determinada y de forma estable mientras incorpora aire exterior. Durante el ascenso la temperatura de la columna va disminuyendo debido al enfriamiento producido por la expansión adiabática y la mezcla con aire atmosférico, lo que se traduce en una pérdida de la capacidad ascensional que inmediatamente ocasiona una expansión radial de la columna. La mayor interacción de la atmósfera con el techo de la columna provoca una reducción de la velocidad frontal, lo que origina el ensanchamiento típico en forma de champiñón.

Colapso de la columna eruptiva:

La columna eruptiva, formada por piroclastos y gases, asciende mediante un mecanismo convectivo y mezclándose con el aire. Este proceso exige que la densidad de la columna se mantenga inferior a la del aire que la rodea. Si en un momento determinado esta condición no se cumple, la columna se desploma (Wilson y Walker, 1987; Woods, 1988). El colapso de la columna se produce por varias causas

(Fig.2.30), como son la variación en el contenido de gas, la caída de la velocidad de salida (por pérdida de presión o bien por aumento en el tamaño del conducto).

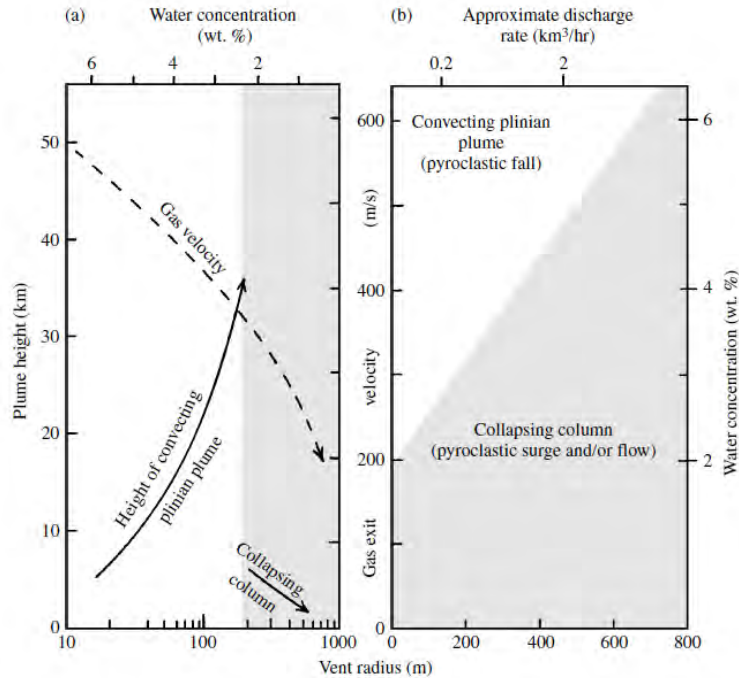


Fig.2.30: Modelos de flujo dinámico de los factores de control en plumas volcánicas. (a) Modelo dinámico específico para un magma silíceo en el cual $T=1200K$, en el conducto prevalece la presión litostática, y el agua es el único volátil. La concentración de agua decreciente del magma en expulsión (de la cámara zonada en la que el magma inicialmente tiene aprox. un 6% en peso) reduce la velocidad de escape de la pluma de gas en la chimenea. Con el incremento del radio del cráter (debido a la erosión durante la erupción explosiva), la altura de la pluma pliniana en convección, en principio, aumenta como resultado del incremento de la tasa de descarga del magma y la energía térmica disponible para calentar el aire arrastrado que proporciona la sustentación; sin embargo, cuando la tasa de descarga alcanza un valor crítico con un radio del cráter de 200m y concentración de agua cercana a 2.4% en peso, la masa eruptiva es demasiado grande para ser empujada por el influjo del aire caliente y la pluma se colapsa (la parte gris de la figura). (b) las condiciones generales del modelo muestran que las plumas plinianas de convección son favorecidas si el magma tiene una concentración de agua alta y una velocidad alta de salida en una chimenea de diámetro pequeño mientras que las plumas en colapso ocurren en condiciones opuestas. Notar que una erupción en particular puede ser estabilizada o sustentada en uno u otro régimen de pluma en convección o en colapso (Redibujado de Wilson et al., 1980) (Myron G Best, 2003).

2.5.4 Clasificación de los depósitos piroclásticos

Las rocas piroclásticas son aquellas que, como su nombre indica, están constituidas por piroclastos. Fisher define los piroclastos *como fragmentos que entraron al medio de transporte y al sitio de deposición a través de las chimeneas volcánicas durante los procesos alimentados por la erupción volcánica; por ejemplo, fragmentos que se originan a partir de erupciones volcánicas o como una consecuencia directa de una erupción* (Fisher y Schmincke 1984).

Actualmente, hay 4 grandes líneas para clasificar genéticamente a las rocas volcánicas fragmentarias. Uno de los sistemas terminológicos más antiguos y que sigue siendo ampliamente utilizado fue introducido en los comienzos de los años 60 (Fisher 1961, 1966, Fisher y Schmincke 1984, 1994). Esta es la terminología usada en el libro titulado “Pyroclastic Rocks” (Fisher y Schmincke 1984). A finales de los 80, otro trabajo importante recopila nuevos datos vulcanológicos y extiende el uso de varios términos aplicando métodos de clasificación basados en esquemas de análisis de facies utilizados en un ambiente sedimentario normal (Cas y Wright 1987). Este trabajo se resume en el libro titulado “Volcanic Successions” (Cas y Wright 1987). A comienzo de los noventa, urge la necesidad de generar una clasificación genética de las rocas volcánicas fragmentarias, basadas en los procesos de transporte y deposición que forman los fragmentos volcánicos (McPhie et al. 1993). Este trabajo culmina en un libro con título “Volcanic Textures” (McPhie et al. 1993). Recientemente se ha sugerido un nuevo sistema de terminología, el cual combina elementos de los sistemas de clasificación previos en un sistema terminológico simple y fácil de usar (White y Houghton 2006).

Existen dos tipos de definiciones para las rocas volcanoclásticas, que resultan directamente de una erupción volcánica como depósitos volcanoclásticos, ambas están basadas predominantemente en el tamaño de partículas de las rocas/depósitos. Una utiliza términos inicialmente reservados para las rocas piroclásticas (Fisher y Schmincke 1984), la otra aplica, a todas las rocas volcanoclásticas, una terminología sedimentológica clástica (Cas y Wright 1987, McPhie et al. 1993).

Antes de explicar los sistemas terminológicos nombrados anteriormente, se va a describir una clasificación textural básica de las rocas volcánicas fragmentarias. Esta clasificación textural, junto a la distribución del tamaño de grano de las rocas/depósitos volcánicos, son el principal parámetro de clasificación usado en la clasificación de dichas rocas.

Componentes generales de las rocas volcanoclásticas:

Una roca fragmentaria es una mezcla de clastos de diferentes orígenes que se depositaron juntos formando un depósito, y que después de la diagénesis dan lugar a una roca (Fig.2.31 y Fig.2.32). Estos fragmentos pueden estar en varias proporciones

dentro de una misma roca/depósito volcánico fragmentario. Su proporción, composición y patrones de distribución darán lugar a una textura específica, la cual es característica de la fragmentación, transporte, deposición e historia de alteración de las rocas volcánicas fragmentarias. La mayoría de los tipos de fragmentos en estas rocas son fragmentos juveniles, fragmentos líticos accidentales y fragmentos líticos accesorios (Fisher y Schmincke 1984, Cas y Wright 1987, McPhie et al. 1993).

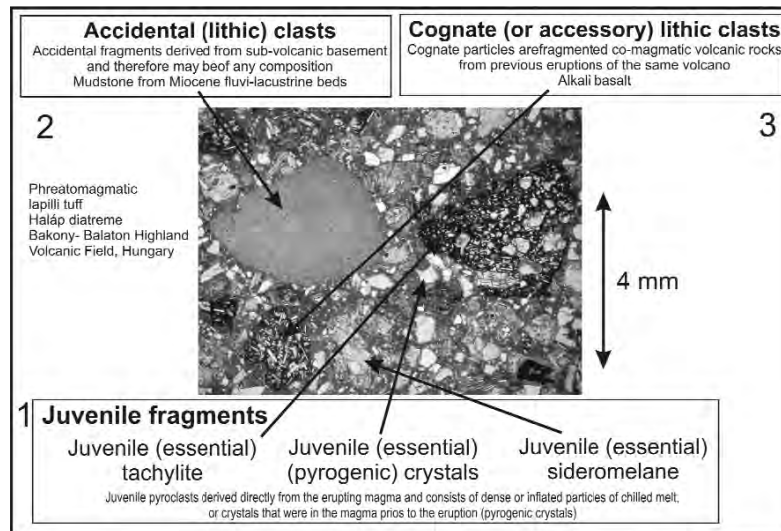


Fig.2.31: Aplicación de la terminología de Fisher y Schmincke (1984) para las rocas piroclásticas del Mio/Plioceno Bakony-Balaton Highland Volcanic Field maar.

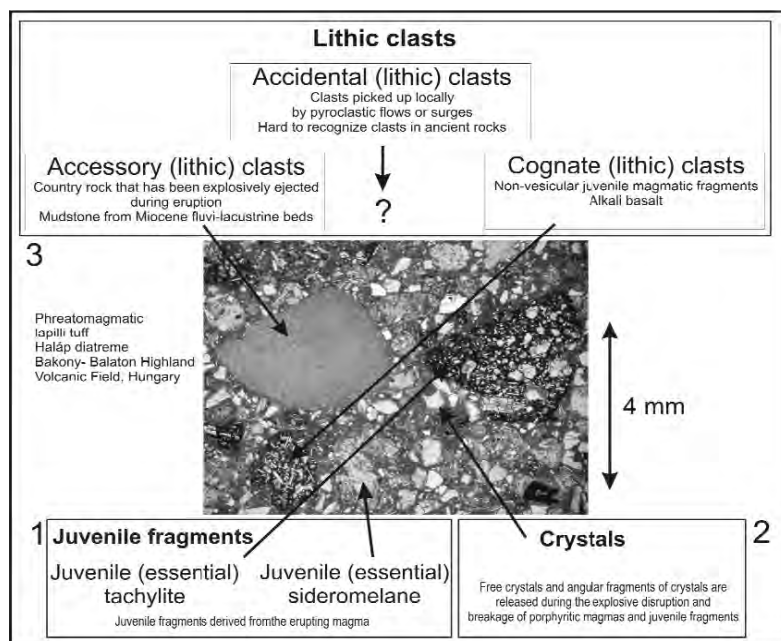


Fig.2.32: Aplicación de la terminología de Cas y Wright (1987) para las rocas piroclásticas del Mio/Plioceno Bakony-Balaton Highland Volcanic Field maar (mismo ejemplo que la Fig. 31).

Fragmentos juveniles:

Los fragmentos juveniles se derivan directamente del magma en erupción, y consisten en partículas densas o infladas del fundido enfriado, o cristales que estaban en el magma antes de la erupción (Fisher y Schmincke 1984). Estos fragmentos comúnmente se distinguen de acuerdo a su apariencia. Tal distinción en el volcanismo máfico separa los fragmentos juveniles en taquilita, sideromelana y cristales (Fisher y Schmincke 1984). Taquilita es un vidrio volcánico de color oscuro, cargado de minerales opacos. Generalmente, la presencia de taquilita indica enfriamiento lento del fundido después de la fragmentación (por ejemplo, sistema de transporte aéreo) (Fisher y Schmincke 1984). La Sideromelana es un fundido máfico enfriado, y por lo tanto vítreo, transparente (Fisher y Schmincke 1984). Su presencia indica un enfriamiento rápido. Dependiendo del tiempo de vesiculación del magma, el fragmento de vidrio de sideromelana puede estar libre de vesículas, o lleno de vesículas de diferentes formas y tamaños. El enfriamiento repentino puede, también, estar reflejado en el colapso de las vesículas (Taddeucci et al. 2004). Dado su baja viscosidad, las burbujas en un fundido basáltico colapsan poco después de la fragmentación, y la presencia de vesículas bien desarrolladas y redondas con delgadas septas en la sideromelana se puede explicar fácilmente si la expansión de las burbujas y la coalescencia estaba todavía en proceso cuando los clasto se templaron (Taddeucci et al. 2004).

A la inversa, la falta de vesículas bien desarrolladas en la taquilita sugiere que las burbujas de gas habían escapado ya del fundido o colapsado cuando las partículas se templaron (Taddeucci et al. 2004).

Fragmentos líticos accesorios y accidentales:

Los fragmentos (líticos) accidentales definidos por Fisher y Schmincke (1984) son aquellos que se derivan del basamento sub-volcánico y por lo tanto puede tener cualquier composición (Fig.2.31). En el mismo esquema de clasificación los fragmentos líticos accesorios son rocas volcánicas co-magmáticas fragmentadas de erupciones previas del mismo volcán.

Características de estratificación:

La característica más importante en relación a la estratificación es el espesor de los estratos. Para los materiales piroclásticos se utiliza la misma clasificación que se usa en las rocas sedimentarias (Ingram 1954) (Fig.2.33). Depósitos finamente laminados a finamente estratificados están comúnmente asociados a las sucesiones distales de Tefra o a los depósitos formados por corrientes densas de piroclastos. Importantes categorías de clasificación utilizadas en sedimentología volcanoclástica se refieren a la textura interna de los estratos como masiva (por ejemplo, no presenta laminación interna, u otros rasgos característicos como granoselección, estructura lenticular, etc.)

o estratos débil a moderadamente definidos. Estas características texturales contienen información importante sobre los agentes de transporte, tales como los aspectos físicos del flujo incluyendo la reología y la concentración de partículas. La continuidad de los estratos también es un parámetro importante de clasificación en los sedimentos volcanoclásticos, los cuales pueden ser paralelamente estratificados, fuertemente ondulados, o estratificación de dunas. Estos tipos de estratificación también son indicativos de las propiedades físicas de los agentes deposicionales. Los patrones de distribución vertical de las partículas, expresados como granoselección en el depósito, puede ser muy complejo (Fig.2.34). Las más comunes son: la granoselección normal (Fig.2.35, Caso A), la inversa a normal (Fig.2.35, Caso C) y la inversa “pura” (Fig.2.35, Caso B).

Name	Thickness
Very thickly bedded	> 1 m
Thickly bedded	30–100 cm
Medium bedded	10–30 cm
Thinly bedded	3–10 cm
Very thinly bedded	1–3 cm
Thickly laminated	0.3–1 cm
Thinly laminated	<0.3 cm



Fig.2.33: Categorías de los espesores de estratos, usados en sedimentología según Ingram (1954) (según Fisher y Schmincke 1984: p.108, Tabla 5-5).

Fig.2.34: Granoselección normal en estratos de lapillis pumiceos de la zona volcánica de Taupo, Nueva Zelanda.

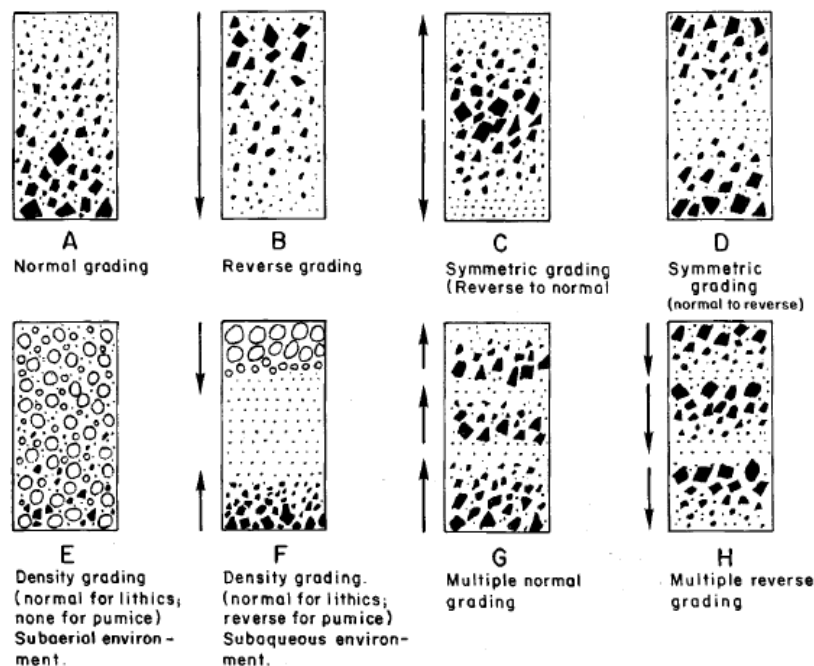


Fig.2.35: Tipos de granoselección típicos, según Fisher y Schmincke 1984: p.109, fig. 5-19.

Por otro lado, la estratificación cruzada es especialmente importante en la interpretación de las propiedades físicas de los depósitos de corrientes densas piroclásticas, y sus tipos pueden estar asociados con los regímenes de flujo de corriente (Fig.2.36). La estratificación cruzada es una característica importante en muchos tipos de corrientes densas de piroclastos (por ejemplo, no es importante en los depósitos de flujos de cenizas y bloques pero si es muy importante en los depósitos de oleadas piroclásticas).

La selección es una descripción de los patrones de distribución de tamaños de partículas de las rocas/depósitos, desde la distribución unimodal hasta las más complejas con diferentes clases de tamaños de granos. Un depósito/roca está bien seleccionado cuando tiene una población de clastos bien definida que constituye el volumen principal del depósito/roca. Depósitos/rocas pobremente seleccionadas son aquellos que están constituidos por un amplio rango de tamaño de clastos.

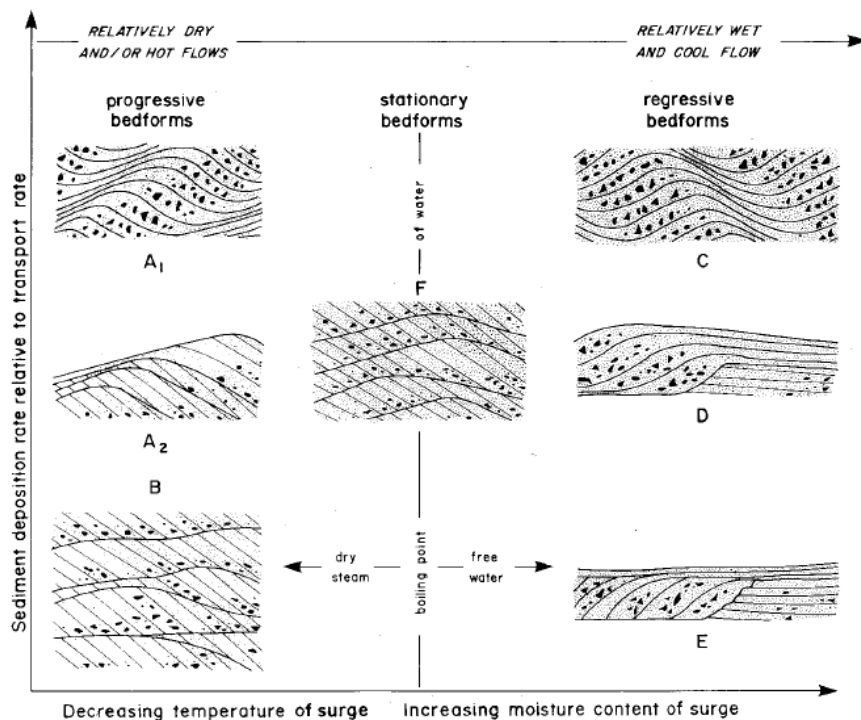


Fig.2.36: Tipos de bedform de oleadas piroclásticas y estratificación cruzada interna (en Allen 1982, en Cas y Wright 1987: p.215, fig. 7.42) como una función de la tasa de sedimentación y temperatura de oleada y contenido en humedad.

A continuación se repasan las diferentes clasificaciones existentes de las rocas volcanoclásticas.

2.5.4.1 Clasificación de las rocas volcanoclásticas en función del tamaño de grano. *Fisher y Schmincke (1984)*:

Para los depósitos volcanoclásticos primarios, la terminología de Fisher y Schmincke (1984) usa como concepto clave el tamaño de grano, tal como toba de lapillis y cenizas. Los piroclastos en la terminología de Fisher y Schmincke (1984) están definidos como clastos formados en conexión con erupciones volcánicas, es decir, clastos expelidos a través de la chimenea volcánica, sin hacer referencia a la causa de la erupción o al origen de la fragmentación (Schmid 1981) (Fig.2.37). Fisher y Schmincke distinguen entre fragmentos hidroclásticos y fragmentos piroclásticos. Los fragmentos hidroclásticos son aquellos formados por la fragmentación debido a la interacción agua-magma. Los fragmentos volcánicos formados por la meteorización de rocas existentes son definidos como fragmentos epiclásticos, aunque Cas y Wright usan el término erosión en lugar de meteorización, para definir los epiclastos. Los fragmentos formados durante la fragmentación mecánica de rocas efusivas se denominan fragmentos autoclásticos. Los fragmentos aloclásticos son los que se forman por la ruptura de rocas volcánicas pre-existentes por procesos ígneos, con o sin la participación directa de magma. En esta clasificación también se incluye la diferencia entre las rocas piroclásticas y las epiclásticas (Fig.2.38) (Schmid 1981). Las rocas piroclásticas están definidas fundamentalmente por su tamaño de grano (Schmid 1981). También se desarrollan términos para los depósitos/rocas piroclásticos mezclados (Fig.2.39) y se usan varios nombre para distinguir entre formaciones sueltas (depósitos) y consolidadas (rocas) (Fig.2.40).

Clast size	Pyroclast	Pyroclastic deposit	
		Mainly unconsolidated: tephra	Mainly consolidated: pyroclastic rock
64 mm	Block, bomb	Agglomerate, bed of blocks or bomb, block tephra	Agglomerate, pyroclastic breccia
	Lapillus	Layer, bed of lapilli or lapilli tephra	Lapillistone
2 mm	Coarse ash grain	Coarse ash	Coarse (ash) tuff
1/16 mm	Fine ash grain (dust grain)	Fine ash (dust)	Fine (ash) tuff (dust tuff)

Fig.2.37: Clasificación granulométrica de los piroclastos y de los depósitos piroclásticos bien seleccionados y unimodal. (Schmid 1981) (De Fisher y Schmincke 1984: p.90, tabla 5-1).

Pyroclastic ^a	Tuffites (mixed pyroclastic- epiclastic)	Epiclastic (volcanic and/or nonvolcanic)	Average clast size (mm)
Agglomerate, agglutinate pyroclastic breccia	Tuffaceous conglomerate, tuffaceous breccia	Conglomerate, breccia	64
Lapillistone			
(Ash) tuff	Tuffaceous sandstone	Sandstone	2
coarse	Tuffaceous siltstone	Siltstone	1/16
fine	Tuffaceous mudstone, shale	Mudstone, shale	1/256
100%	75%	25%	0% by volume
(increase) ← Pyroclasts			
(increase) → Volcanic + nonvolcanic epiclasts (+ minor amounts of biogenic, chemical sedimentary and authigenic constituents)			

Fig.2.38: Términos para la mezcla de rocas piroclásticas-epiclásticas, según Schmid (1981) (de Fisher y Schmincke 1984: p.91, tabla 5-2).

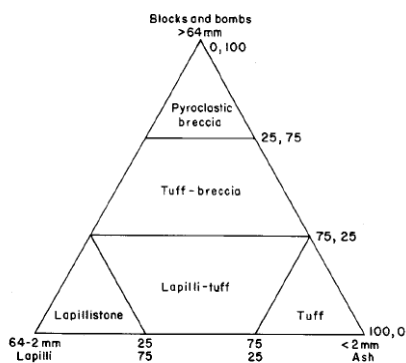


Fig.2.39: Diagrama ternario representa la mezcla de términos y miembros-finales de los términos de fragmentos piroclásticos según Fisher (1966) (de Fisher y Schmincke 1984: p. 92, fig. 5-1).

Grainsize (mm)	Pyroclastic fragments		Name of unconsolidated aggregate	Lithified equivalent
	round and fluidally shaped	angular		
256	coarse	bombs	agglomerate (bombs) or pyroclastic breccia	agglomerate (bombs) or pyroclastic breccia
64	fine	blocks		
2		lapilli	lapilli deposit	lapillistone
1/16	coarse	ash	ash deposit	tuff
	fine			

Fig.2.40: Límite de tamaño de grano para agregados piroclásticos según Fisher (1966) (de Cas y Wright 1987:p.354, tabla 12.5). Comparar con el diagrama de la fig. 37.

2.5.4.2 Clasificación de las rocas volcánicas por Cas y Wright (1987):

En la terminología de Cas y Wright, los términos de ceniza y tobas son conceptos claves para los depósitos y rocas piroclásticas. Además, para los depósitos autoclásticos, se usan los términos de hialoclastita-granular, autobrecha-granular o hialoclastos o arenisca autoclástica. De acuerdo con Cas y Wright, los fragmentos en las rocas volcanoclásticas puede ser producidos por procesos volcánicos primarios (en procesos contemporáneos con las erupciones volcánicas) y procesos superficiales secundarios (meteorización, erosión, etc.). Ambos procesos pueden producir tipos de texturas parecidos.

Para Cas y Wright, las rocas volcanoclásticas se clasifican de dos formas: genética y litológicamente. La clasificación genética identifica su origen como piroclastos de caída, coladas piroclástica (Fig.2.41) y oleadas piroclásticas (Fig.2.42). En la clasificación litológica la principal línea de clasificación son: el tamaño de grano y la distribución total de tamaños de los depósitos, los fragmentos constituyente de los depósitos y el grado y tipo de soldadura.

<i>Eruptive mechanism</i>	<i>Pyroclastic flow</i>	<i>Deposit</i>	<i>Essential fragment</i>
eruption column (fountain) collapse	pumice flow, ash-flow	ignimbrite, pumice flow deposit, ash-flow tuff*	pumice
	scoria flow	scoria flow deposit	scoria
lava, dome collapse (explosive and gravitational)	block and ash flow (nuée ardente)	block and ash flow deposit	dense lava
explosive cryptodome release	hot, dry volcaniclastic debris flow	volcaniclastic debris flow	accessory lithics (± juvenile fragments)

↑ decreasing density of juvenile clasts

* In a strict definition, 'ash-flow tuff' should only refer to deposits with >50 wt% finer than 2 mm. 'Ignimbrite' and 'pumice-flow deposit' can be used more loosely irrespective of grain size, although 'pumice-flow deposit' is sometimes used to emphasise those flow deposits with a large proportion of bomb-sized pumice fragments.

Fig.2.41: Clasificación genética de las coladas piroclásticas y sus depósitos, según Cas y Wright 1987: p.352, tabla 12.2.

<i>Eruptive mechanism</i>	<i>Pyroclastic surge type</i>	<i>Temperature, water content</i>	<i>Essential fragment</i>
phreatomagmatic (outward moving radial collar and column collapse)	base surge	cold, wet (hot, dry)	juvenile (vesiculated to non-vesiculated); accessory lithics
accompanying pyroclastic flows	ground surge	hot, dry	juvenile (vesiculated to non-vesiculated)
	ash-cloud surge	hot, dry	juvenile (vesiculated to non-vesiculated)
accompanying pyroclastic fall eruptions (but without generation of a pyroclastic flow)	ground surge	hot, dry	juvenile (vesiculated)

Fig.2.42: Clasificación genética de las oleadas piroclásticas y sus depósitos, según Cas y Wright 1987: p.353, tabla 12.4.

2.5.4.3 Clasificación de las rocas volcánicas por McPhie et al. (1993):

McPhie distingue dos tipos de rocas volcánicas: coherentes y volcanoclásticas (Fig.2.43).

En la clasificación de McPhie et al. (1993), las rocas fragmentarias resultantes se clasifican de acuerdo con los procesos deposicionales y de transporte que generaron los depósitos/rocas.

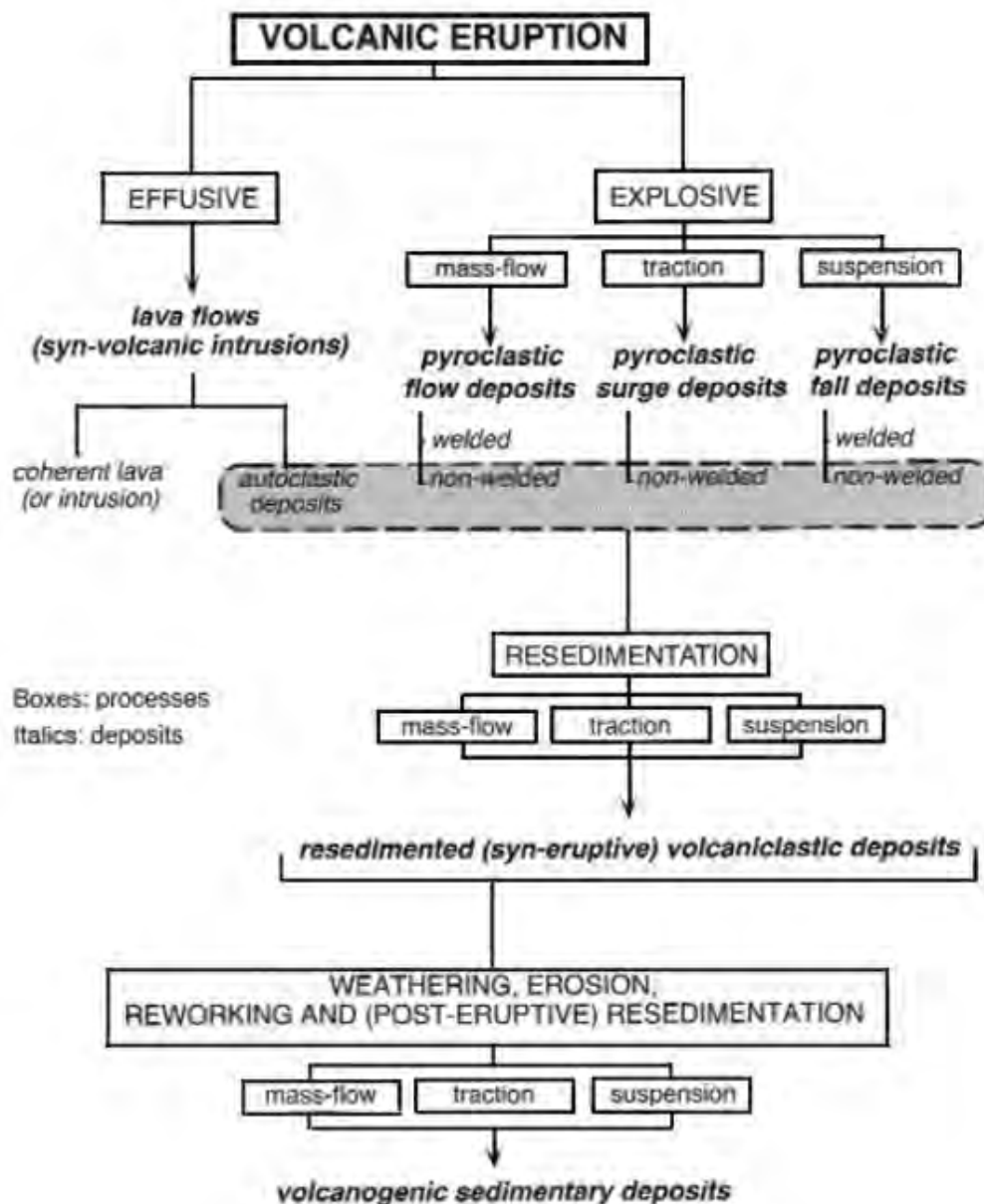


Fig.2.43: Clasificación genética de los depósitos piroclásticos, según McPhie et al. 1993: p.2, Fig.1). Los procesos deposicionales son los mismos tanto en los depósitos primarios como en los resedimentados y los volcanoclásticos re trabajados. Los depósitos volcanoclásticos primarios no soldados están resaltados en un cuadro gris y con líneas discontinuas.

Tres tipos principales de mecanismos de transporte (Flujo en masa, tracción y suspensión) se consideran responsables de la mayoría de las características texturales que se forman. Estos tres tipos de transporte están estrechamente ligados a procesos volcánicos tradicionalmente reconocidos como transporte de flujo en masa en coladas piroclásticas, transporte por tracción en oleadas piroclásticas y deposición por suspensión como piroclastos de caída. También se distinguen tres niveles de procesos que forman rocas volcánicas fragmentarias. Las categorías de rocas volcánicas en esta clasificación son: 1) lavas coherentes e intrusiones (Fig.2.44), 2) depósitos piroclásticos primarios (Fig.2.45), 3) depósitos de procesos de resedimentación (Fig.2.46), y 4) procesos de resedimentación post-eruptiva y re trabajado que dan lugar a sedimentos volcanogenéticos.

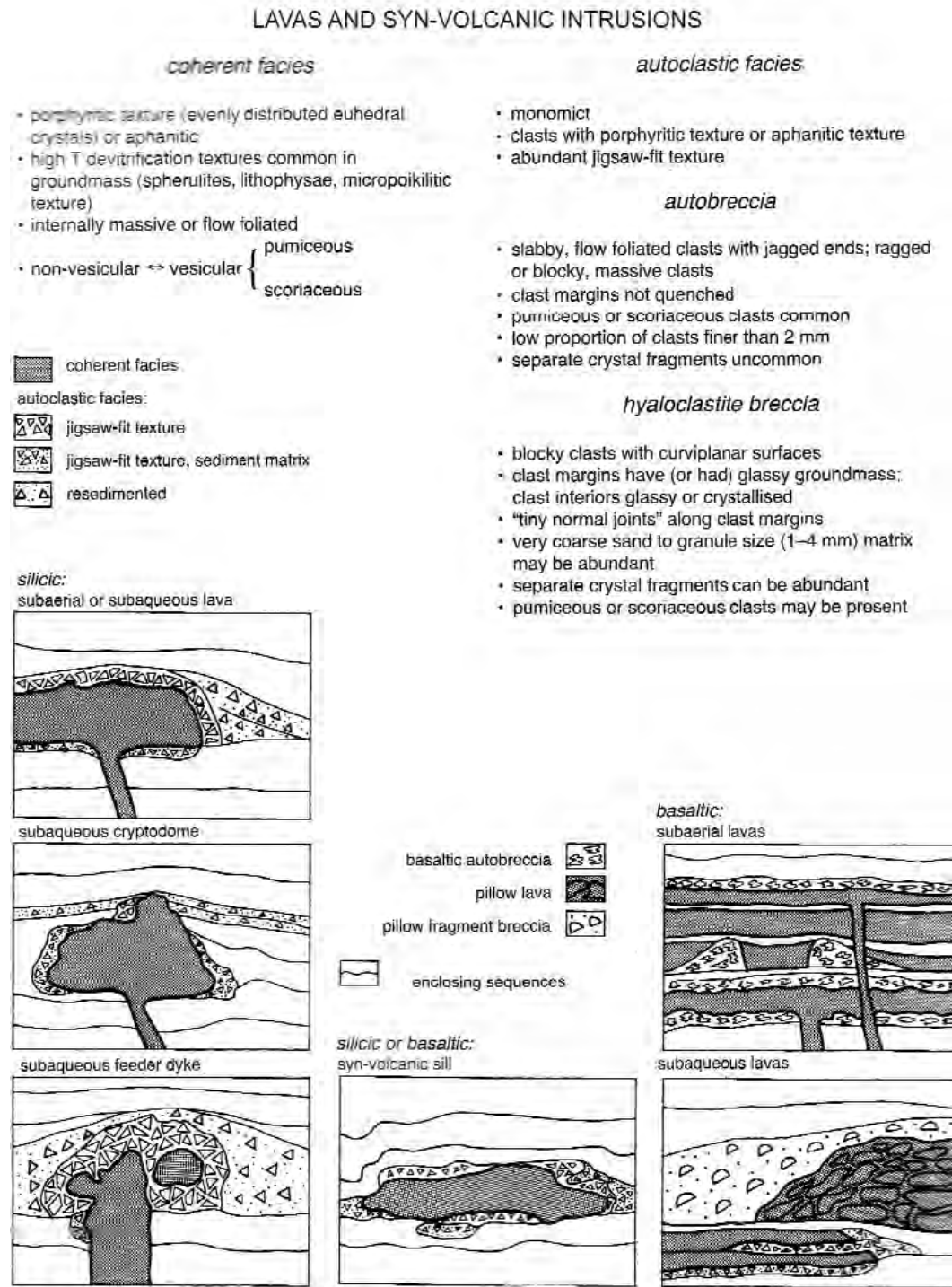


Fig.2.44: Clasificación genética y características básicas de lavas y de las intrusiones sin-volcánicas, según McPhie et al. 1993: p.4, fig.2.

PYROCLASTIC DEPOSITS

deposits from explosive magmatic and phreatomagmatic eruptions:

- composed of crystals, pumice or scoria clasts, other less vesicular juvenile clasts, lithic fragments
- pumice or scoria and other juvenile clasts show porphyritic texture, or are aphanitic
- abundant crystal fragments in matrix
- lithic clasts sparse to abundant

explosive magmatic

- abundant bubble-wall glass shards in matrix
- pumice or scoria clasts usually have wispy or ragged margins, and lenticular, platy or blocky shapes
- accretionary lapilli occur
- welded or non-welded

phreatomagmatic

- abundant blocky and splintery glass shards
- pumice or scoria and other juvenile clasts are typically blocky; curvilinear surfaces common
- accretionary lapilli common
- usually non-welded
- dominantly ash and fine lapilli

deposits from phreatic eruptions:

- composed of lithic pyroclasts; hydrothermally-altered clasts common
- accretionary lapilli common
- small volumes ($\ll 1 \text{ km}^3$), limited extent ($\leq 2 \text{ km}$ from source)
- mainly fall and surge deposits
- non-welded

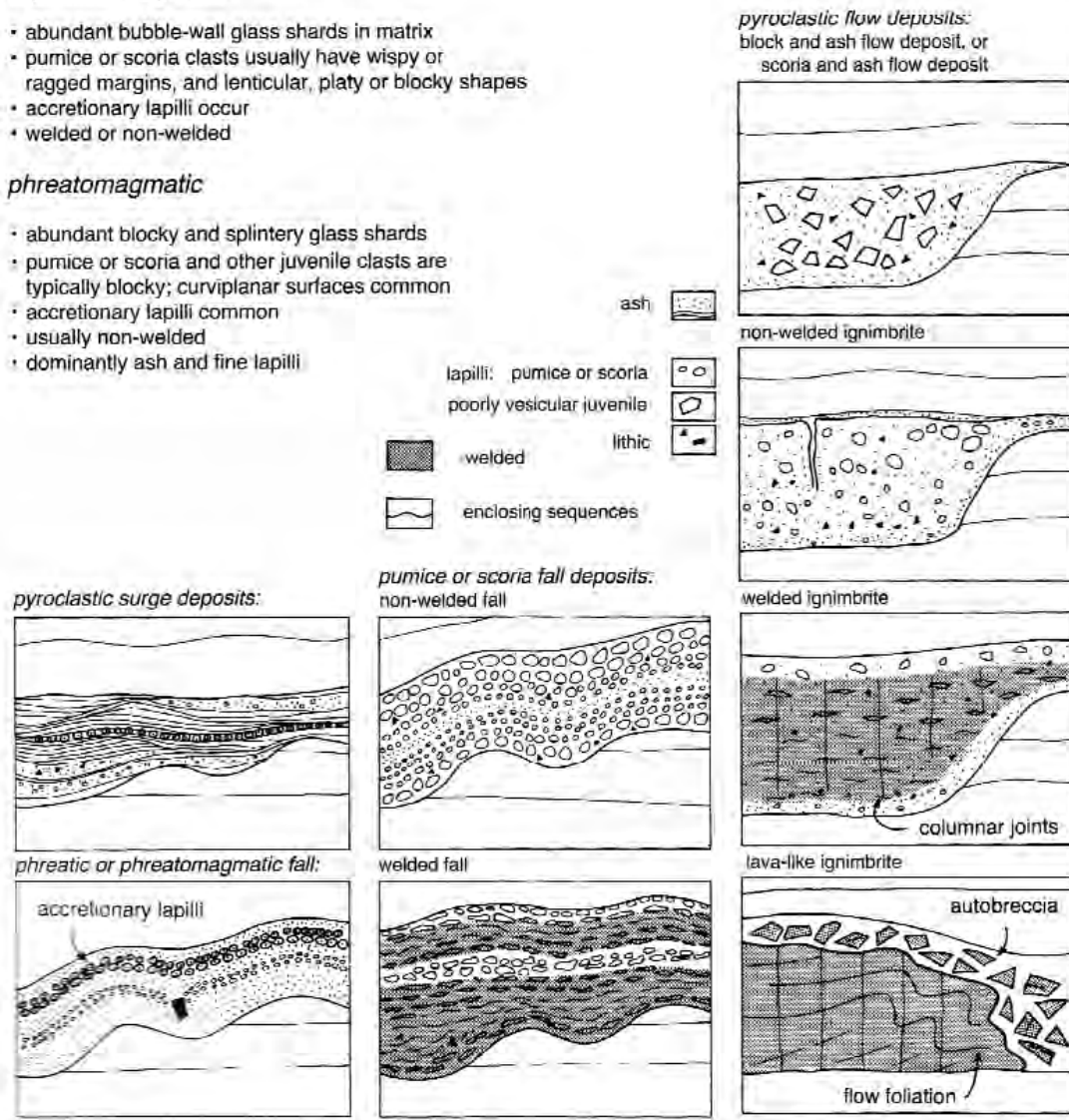


Fig.2.45: Clasificación genética y características básicas de los depósitos piroclásticos (primarios), según McPhie et al. (1993, p.5, fig.3).

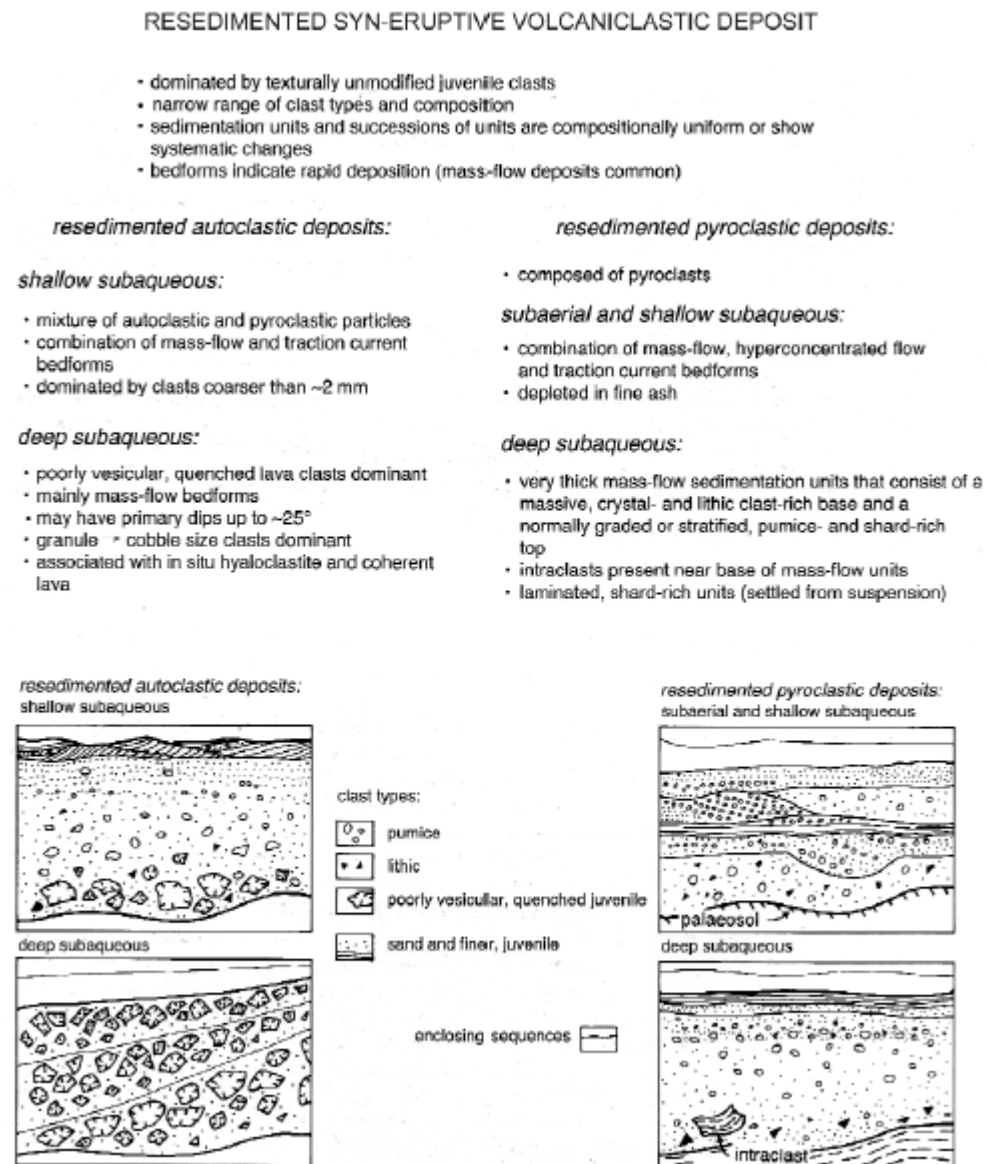


Fig.2.46: Clasificación genética y características básicas de los depósitos volcanoclásticos sin-eruptivos resedimentados, según McPhie et al. 1993: p.6, fig.4.

2.5.4.4 Clasificación de los depósitos volcanoclásticos primarios según White y Houghton (2006):

Según los autores los depósitos volcanoclásticos primarios son aquellos depósitos primarios que no implican almacenamiento provisional, independientemente del tipo de transporte de los clastos.

En esta clasificación los clastos resultantes de la meteorización no se denominan como volcanoclásticos, en lugar de esto, se nombran con términos sedimentarios, tales como arenisca basáltica, etc. Todas las rocas volcanoclásticas primarias son, por

tanto, descritas usando los términos de tamaño de grano inducidos por Fisher y Schmincke (1984), términos como cenizas, tobas, tobas de brechas, etc.

Para describir la selección del material, los autores sugieren utilizar la clasificación aplicada en sedimentología clástica (bien seleccionado, pobremente seleccionado, etc.) (White y Houghton, 2006). Se puede añadir la morfología de los clastos como un modificador descriptivo en el nombramiento de los depósitos volcanoclásticos primarios. El término “redondeado” se usa para expresar la abrasión de los clastos, y “fluidas” o “ameboidea” para describir formas aerodinámicas o clastos con formas no producidas por abrasión.

En esta clasificación los autores reconocen cuatro variedades genéticas de rocas volcanoclásticas primarias, basadas en la forma en la que se depositaron o emplazaron (Tabla 2.3).

- 1- Piroclásticos, aquellos que se sedimentaron desde columnas o corrientes piroclásticas.
- 2- Autoclásticos, depositados directamente de lavas, formada por enfriamiento mediante aire.
- 3- Hialoclásticos, deposición directa de fragmentos de lavas, formados por refrigeración por agua.
- 4- Peperíticos, depósitos emplazados durante la mezcla de magma con depósitos húmedos (deposición in situ).

Tabla 2.3: Variedad de rocas volcanoclásticas según White y Houghton 2006: p.679. Tabla 3.

Process	Deposit adjective (noun)
Sedimentation from pyroclastic plumes and currents	Pyroclastic (various)
Deposition of fragments from lava, formed via air cooling	Autoclastic (autobreccia)
Deposition of fragments from lava, formed via water chilling	Hyaloclastic (hyaloclastite)
Mingling of magma with wet sediment, ~in situ deposition	Peperitic (peperite)
<i>Note: All should be given grain-size names based on grain size and degree of lithification</i>	

2.5.5 Características de los depósitos piroclásticos

Como se ha comentado en apartados anteriores, la actividad volcánica explosiva genera piroclastos. De acuerdo con al modo de transporte y depósito se reconocen tres categorías genéticas principales (Sparks y Walker, 1973) (Fig.2.47):

1. Depósitos de piroclastos de caída (pyroclastic fall).
2. Depósitos de coladas piroclásticas (pyroclastic flow).
3. Depósitos de oleadas piroclásticas (pyroclastic surge).

Aunque se estudien de forma separada, los tres tipos de piroclastos están

generalmente asociados, y pueden incluso ocurrir dentro de una misma erupción.

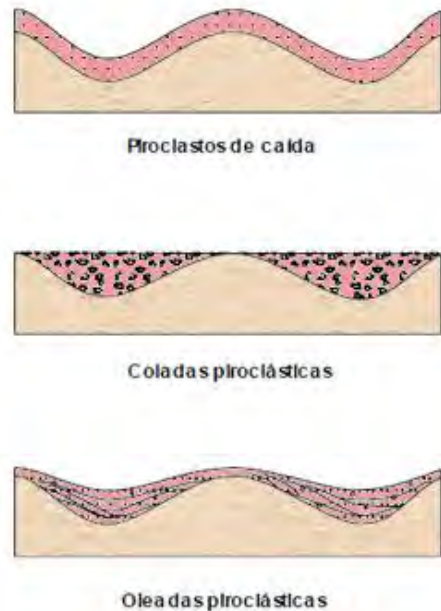


Fig.2.47: Modelos esquemáticos de los distintos tipos de depósitos piroclásticos (Wright et al., 1980).

Depósitos de piroclastos de caída:

El material eyectado por el conducto del volcán pasa a formar parte de una columna eruptiva, que alcanza los estratos altos de la atmósfera. A medida que la pluma se expande en función del viento, los piroclastos tienden a caer por gravedad. La distancia a la que ocurre esto depende del tamaño y densidad de los piroclastos. Por tanto, el tamaño de los fragmentos y la potencia del depósito normalmente disminuyen hacia distancias mayores del foco emisor. Los fragmentos mayores son eyectados balísticamente, se depositan en zonas proximales y se denominan clastos balísticos o eyectos, estos comprenden bloques, bombas y lapillis. Una característica distintiva de estos depósitos es que constituyen extensos mantos que cubren el relieve uniformemente, acumulándose tanto en las depresiones como en las partes altas (Fig.2.47). Estos depósitos se caracterizan por estar constituidos por partículas que tienen igual equivalencia hidráulica, lo que les confiere una mejor selección.

Presentan cambios de composición en sentido aéreo y en sentido vertical. Ello es debido a la estrecha relación entre la granulometría y la composición, y entre el proceso de vaciamiento de las cámaras magmáticas y la composición, respectivamente.

Otra característica es que no presentan una fábrica desarrollada, salvo gradaciones

normales. Asimismo, puede observarse una estratificación grosera debido a variaciones en el comportamiento de la columna eruptiva (pulsos eruptivos).



Fig.2.48: Piroclastos de caída en SW Hokkaido, Japón.

Colombo y Martí (1992) contemplan tres tipos de depósitos de caída en función del mecanismo de depósito:

- Los depósitos de proyección balística están asociados a casi todos los tipos de actividad magmática. Se acumulan cerca al centro emisor y son los responsables de la construcción de los edificios cónicos. Son indicativos de facies proximales y no presentan continuidad lateral. Suelen estar mal seleccionados.

- Depósitos de caída asociados a la dispersión de la columna eruptiva: la distribución y geometría de estos depósitos se relaciona con la altura alcanzada por la columna eruptiva. Las columnas eruptivas bajas tienden a depositar los piroclastos cerca del centro emisor, como es el caso de las erupciones estrombolianas, mientras que las columnas eruptivas altas, como las plinianas, suelen extenderse lateralmente por varios kilómetros.

La mayoría de estos depósitos de caída presentan muy buena selección y una disminución en el tamaño de los clastos a medida que nos alejamos del centro emisor. La estratificación es buena, y se desarrolla como resultado de variaciones en la intensidad de la erupción (Colombo y Martí, 1992).

Estos depósitos están compuestos mayoritariamente por ceniza volcánica, de composición y densidad variable. En erupciones donde la presencia de agua o vapor

en la columna eruptiva es importante, como es el caso de las erupciones freáticas y freatomagmáticas, las cenizas finas tienden a nuclearse alrededor de partículas de agua para formar agregados esferoidales llamados lapilli acrecionales.

-Depósitos de brechas de explosión: su origen está asociado con las primeras fases de actividad explosiva (por ejemplo, freáticas, freatomagmáticas, vulcanianas, etc.), en el momento que se produce la apertura de la boca de salida. Son depósitos gruesos muy mal seleccionados, compuestos principalmente por litoclastos arrancados de las paredes del conducto y emplazados según trayectoria balística. Suelen presentar un bandeo incipiente (Colombo y Martí, 1992).

Depósitos de coladas piroclásticas:

Las coladas piroclásticas (pyroclastic flow, ash flow, pumice flow, ignimbrita, nube ardiente, etc.) son corrientes de piroclastos fluidizadas y de alta densidad que están controladas por la gravedad y se desplazan lateralmente a ras del suelo en un flujo esencialmente laminar en el que la fase continua entre las partículas es gas, siendo la relación partículas/gas elevada (alta concentración) (Sparks, 1976; Walker, 1981). En general, los depósitos de las coladas piroclásticas están controlados por la topografía y rellenan los valles y las depresiones (Fig.2.47). Están mal clasificados, pero a menudo pueden presentar una gradación normal de los fragmentos pumíticos hacia el techo. La mala clasificación de las coladas piroclásticas se atribuye a la elevada concentración de partículas que las caracteriza y no a la turbulencia, pues el movimiento es considerado esencialmente laminar (Wright y Walker, 1981; C. Wilson, 1980).

Los coladas piroclásticas suelen formarse por el colapso de la columna eruptiva. Este colapso puede ser de varias formas y, según sea una u otra, genera diferentes depósitos (Fig.2.50). Los depósitos de coladas piroclásticas ricas en fragmentos pumíticos se denominan ignimbritas y los depósitos de bloques y ceniza de poco volumen originados por el desmoronamiento de domos o colada de lavas se denominan nube ardiente.

Las ignimbritas son depósitos de coladas piroclásticas ricas en material magmático y juvenil vesiculado (pumitas y vitroclastos), emplazados en caliente y que pueden o no estar soldados (Walker, 1983).

Depósitos de oleadas piroclásticas:

Las oleadas piroclásticas son corrientes turbulentas de baja concentración y densidad, fluidizadas, donde la fase continua entre las partículas es gas (Walker, 1981). Los depósitos cubren la topografía pero tienen tendencia a acumularse en los valles (Fig.2.47). Se caracterizan por presentar estructuras sedimentarias unidireccionales (Fig.2.36 y Fig. 2.49) y por estar bien clasificados (Wohletz y Sheridan, 1979).

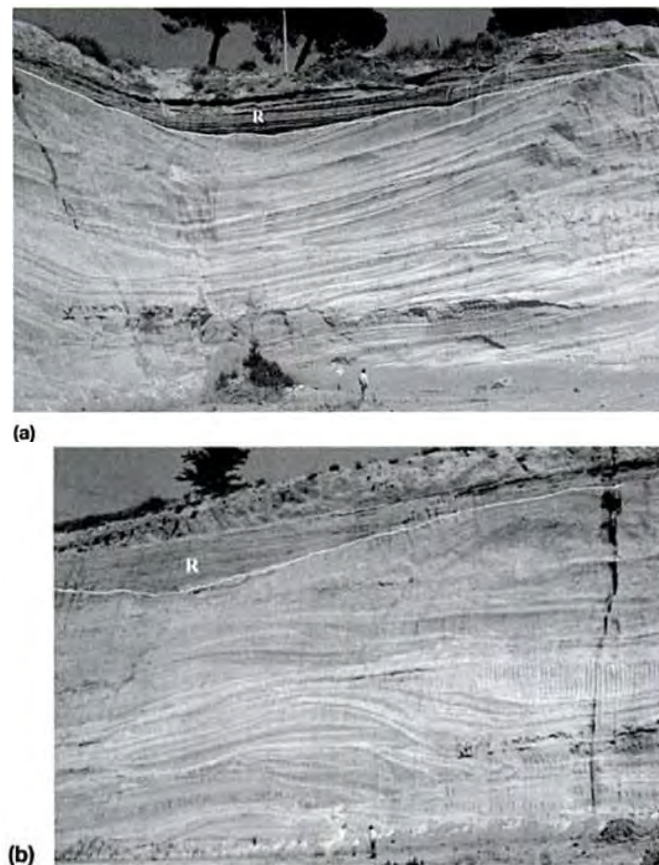


Fig. 2.49: Sección transversal de la Toba Amarilla Napolitana en Zaccaria NW de “*Campi Fleigrei*”. (a) Paralela a la dirección del flujo, el cual viene desde la derecha; (b) Perpendicular a la dirección del flujo. Se observa la naturaleza compleja de multicapas de los depósitos formados por muchos flujos piroclásticos individuales. El depósito alcanza los 30m de espesor en esta localidad. R, son materiales reabajados. Observar la persona como escala.

Con respecto al contenido en vapor de agua pueden diferenciarse dos variedades, depósitos de oleadas piroclásticas húmedas y secas (Sheridan y Wohletz, 1981). Las oleadas piroclásticas húmedas (*wet surges*) se presentan en capas gruesas, relativamente planas y con una estratificación grosera (Wohletz y Sheridan, 1983). La existencia de vapor o agua favorece la cohesión de las partículas (Wilson, 1986). Por su parte los depósitos de oleadas piroclásticas secas (*dry surges*) son finamente laminados, bien estratificados y con un bajo grado de consolidación (Fisher y Schmincke, 1984).

Estos depósitos son característicos de las erupciones hidromagmáticas, aunque también pueden aparecer asociadas a erupciones puramente magmáticas. Se pueden distinguir diversos tipos según sus características genéticas (“base surge”, oleadas piroclásticas producidas en explosiones dirigidas, “ground surges”, “ash cloud surges”) aunque estos presentan características litológicas similares (Fig.2.51).

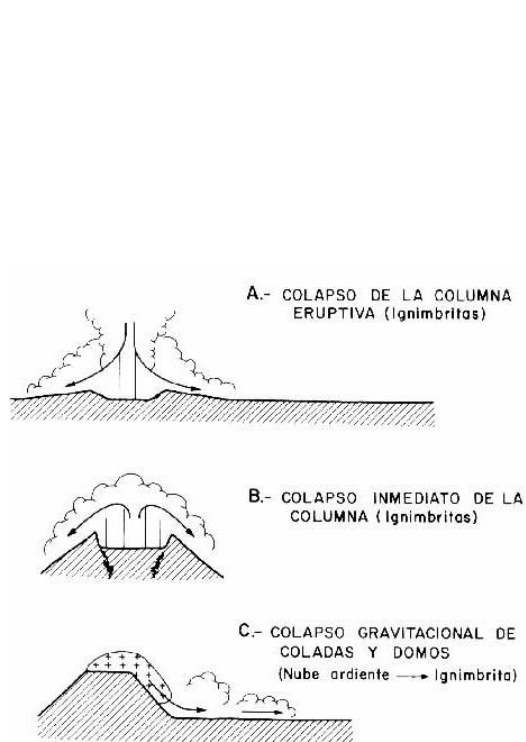


Fig.2.50: Formación y depósito de coladas piroclásticas. J. Martí, 1989.

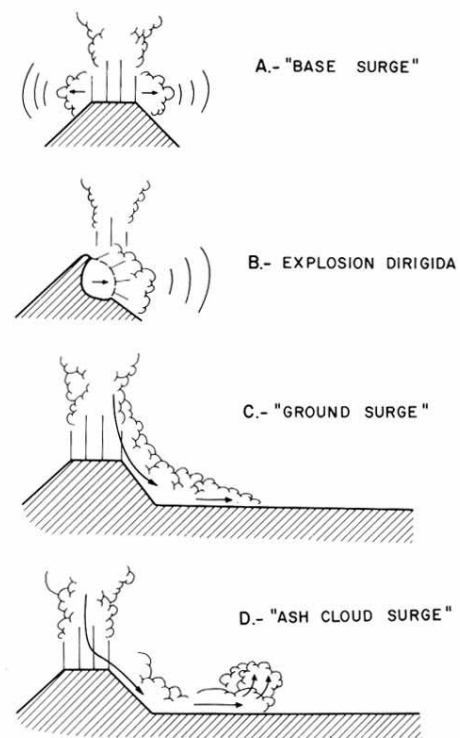


Fig.2.51: Génesis de las Oleadas Piroclásticas ("Surges"). J. Martí, 1989.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE



ÍNDICE

3.1	INTRODUCCIÓN.....	1-2
3.2	PRINCIPALES INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN EL ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS	2-3
3.2.1	GRUPO ESPAÑOL	2-3
3.2.1.1	Año 1970.....	2-3
3.2.1.2	Año 1971.....	2-10
3.2.1.3	Año 1973.....	2-14
3.2.1.4	Año 1976.....	2-19
3.2.1.5	Año 1997.....	2-25
3.2.1.6	Años 1998 a 2002	2-28
3.2.1.7	Año 2006.....	2-31
3.2.1.8	Año 2007.....	2-32
3.2.2	GRUPO ITALIANO	2-37
3.2.2.1	Año 1970.....	2-37
3.2.2.2	Año 1993.....	2-42
3.2.2.3	Año 1994.....	2-47
3.2.2.4	Años 1998	2-54
3.2.3	GRUPO CANADIENSE.....	2-78
3.2.3.1	Año 1975.....	2-78
3.2.4	GRUPO JAPONÉS	2-87
3.2.4.1	Año 1981.....	2-87
3.2.5	GRUPO EEUU.....	2-92
3.2.5.1	Año 1993.....	2-92
3.2.6	GRUPO NUEVA ZELANDA	2-95
3.2.6.1	Año 1993.....	2-95
3.2.7	GRUPO REINO UNIDO	2-102
3.2.7.1	Año 2000.....	2-102
3.3	RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE	3-106
3.4	TERMINOLOGÍA	4-108

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza una síntesis de los estudios llevados a cabo en diversos materiales volcánicos. La mayoría de ellos corresponden a coladas piroclásticas cuya estructura y comportamiento bajo esfuerzos tensionales son muy similares a los de los piroclastos de caída, los cuales son los materiales que se estudian a lo largo de toda esta investigación.

Se separan los grupos por países, es decir, el grupo español corresponde a los estudios llevados a cabo en España y así sucesivamente. Como se verá a lo largo de este capítulo, este tema de investigación es de gran importancia y ha sido estudiado por diferentes países, tales como: Italia, Canadá, Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Reino Unido y España.

Para una mayor comprensión de los estudios realizados a lo largo de los años, se realiza un breve resumen del tipo de material estudiado por cada grupo de investigación y luego se continúa con la explicación de los diferentes ensayos realizados y las conclusiones obtenidas por cada autor.

3.2 PRINCIPALES INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN EL ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS

Como se señaló anteriormente, este capítulo se va a dividir en grupos de trabajo por países, dentro de los cuales se va a separar el tipo de material estudiado y sus ensayos. Dentro de cada material, se va a hacer un resumen cronológico de los diferentes estudios realizados.

3.2.1 GRUPO ESPAÑOL

3.2.1.1 Año 1970

a. Introducción

Uriel, S. y Bravo, B. (1970) realizaron un repaso sobre las condiciones tensionales en la superficie de los huecos verticales con forma elíptica, basados en la solución de Muskhelishvili (1961).

De acuerdo con Muskhelishvili (1961), el esfuerzo tangencial, ζ_ζ , a lo largo del contorno de un hueco elíptico es el siguiente (Fig. 3.1):

$$\sigma_\theta = (\sigma_1 + \sigma_3) \frac{1 - m^2}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2} + 2(\sigma_1 - \sigma_3) \frac{m \cos 2\alpha - \cos 2(\theta + \alpha)}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2}$$

Donde:

$$m = \frac{a-b}{a+b} \text{ (a y b son los semi-ejes de la elipse)}$$

α = Ángulo que forma el eje de longitud $2a$ con la dirección de σ_1 .

ζ = Parámetro que fija el punto de contorno de la elipse.

$$x = a \cos \zeta$$

$$y = b \sin \zeta$$

$\sigma_1; \sigma_3$ = Tensiones principales, positivas si son de compresión.

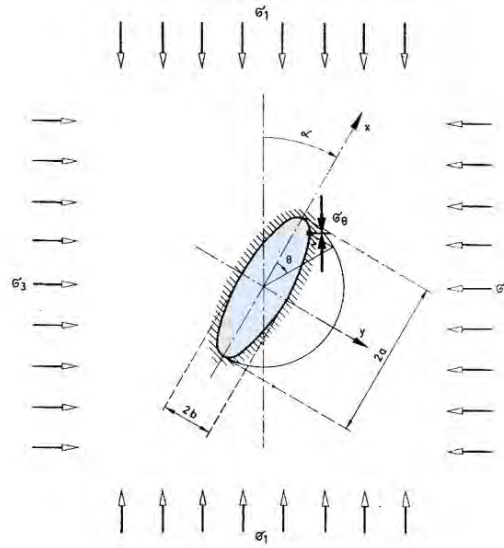


Fig. 3.1: Tensiones tangenciales en el contorno de una grieta elíptica. (Modificada de Uriel y Bravo, 1970).

Basándose en la formulación anterior, los autores analizaron diferentes tipos de rotura, las cuales se van a explicar a continuación.

I. Rotura Frágil:

Cuando la condición de los esfuerzos aplicados en una muestra es tal que la tensión de tracción uniaxial resultante (T), en el contorno de la mayoría de las grietas más desfavorables, es igual al máximo que pueden soportar los contactos entre los cristales, o los cristales propiamente dichos, se producirá una fisura, cuya propagación dependerá de muchos factores (el campo de esfuerzo, el tamaño de grano o cristales, el tipo de contacto entre ellos, el tamaño de las grietas preexistentes, la densidad de la roca, etc.).

A continuación se van a explicar los casos de rotura frágil.

a) Rotura a tracción uniaxial (o tracción simple) ($\sigma_3 = 0$; $\sigma_1 < 0$):

En este caso el punto de mayor tensión es el 4 de la Fig. 3.2. La grieta se propagará cuando:

$$\left(2\frac{a}{b} + 1\right)\sigma_1 = -T$$

La tensión de tracción aumenta en magnitud con la excentricidad. La propagación de la fisura será normal a σ_1 y en la misma dirección que la de la grieta original.

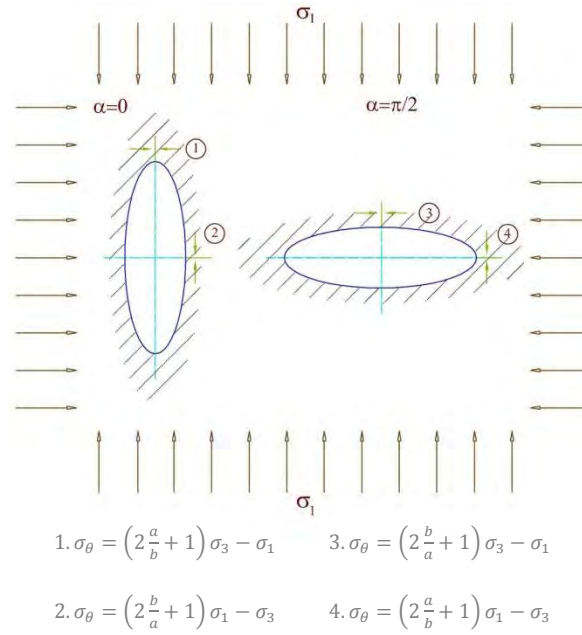


Fig. 3.2: Tensiones tangenciales máximas en los extremos de una grieta. (Modificada de Uriel y Bravo, 1970).

En este caso, la resistencia a la tensión de tracción es:

$$\sigma_T = -T/2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right)$$

b) Rotura a compresión simple ($\sigma_3 = 0$; $\sigma_1 > 0$):

En todas las grietas tiene lugar una tensión de tracción igual a la compresión aplicada, independientemente de la orientación de las mismas. Sin embargo, las grietas que se pueden propagar con mayor rapidez son aquellas con el eje axial mayor vertical, en vista del hecho de que la fisura puede continuar en su propia dirección, en el que hay más probabilidad de encontrar áreas débiles.

$$\sigma_c = T$$

La relación entre la resistencia de compresión uniaxial y la resistencia a la tracción será: $\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = 2 \left(\frac{a}{b} + 1 \right)$, dependiendo de la forma de la grieta.

c) Rotura a compresión biaxial ($\sigma_3 > 0$; $\sigma_1 > 0$):

Para unos valores fijos de σ_3 , la σ_1 mínima que induce a una tracción igual a T, correspondiente al punto 3 de la Fig. 3.2.

$$\sigma_1 = T + \sigma_3 \left(2 \frac{a}{b} + 1 \right)$$

Esta relación entre σ_3 y σ_1 , establece la condición para el comienzo de la fisuración en aquellas elipses con su eje mayor horizontal.

La envolvente de Mohr para la iniciación de la rotura frágil es (Fig. 3.3):

$$\tau = \frac{\frac{a}{b}\sigma + \frac{T}{2}}{\sqrt{2\frac{a}{b} + 1}}$$

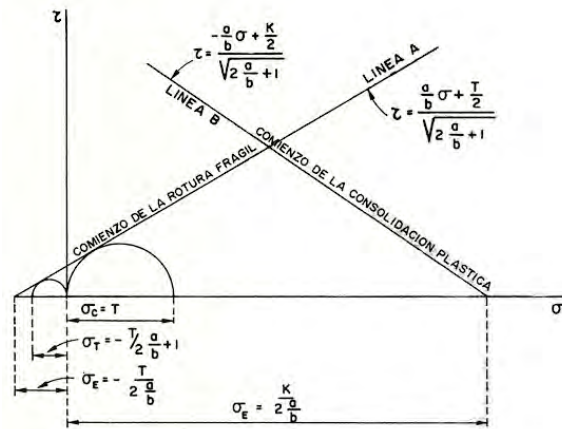


Fig. 3.3: Condiciones para la iniciación de la rotura frágil y plástica. Línea A-Envolvente de Mohr-Coulomb para rotura frágil. Línea B-Envolvente de Mohr para la rotura plástica. (Uriel y Bravo, 1970).

II. Rotura Plástica:

Según indican los autores (Uriel y Bravo, 1970), se ha comprobado de forma experimental que para altas presiones, cualquier tipo de roca se comportará como un material totalmente cohesivo, con un ángulo de fricción nulo o muy pequeño. Para estas presiones parece lógico adoptar un ángulo de fricción pequeño y como criterio de rotura el de la tensión de corte máxima.

Para una compresión media baja, las condiciones de rotura serán diferentes. Sin embargo, la concentración de las tensiones en los bordes de las grietas puede aumentar la presión en algunas áreas sometidas a tensión hasta un valor considerable, bajo el cual es posible romper los contactos entre planos moleculares adyacentes, y en consecuencia, el criterio anteriormente mencionado puede ser aplicado.

En el borde de una grieta esta condición es equivalente a establecer que la compresión tangencial alcanza un cierto valor igual al doble de la tensión de tracción inicial, por lo que el material puede llegar a plastificar (Fig. 3.4).

Según esta teoría, el comienzo de la plastificación tiene lugar cuando se verifica la relación (Fig. 3.2):

$$\left(2\frac{a}{b} + 1\right) \sigma_1 - \sigma_3 = K$$

En los extremos de la grieta, como σ_1 aumenta, el área plastificada también aumenta y, simultáneamente, las grietas con diferente orientación comenzarán a plastificar, hasta que aquellos en posición vertical estén también afectados. Esto ocurre si la tensión principal σ_1 alcanza el valor:

$$\left(2\frac{b}{a} + 1\right) \sigma_1 - \sigma_3 = K$$

Cuando la plastificación se generaliza, se observa un cambio claro en el módulo de deformación de la roca.

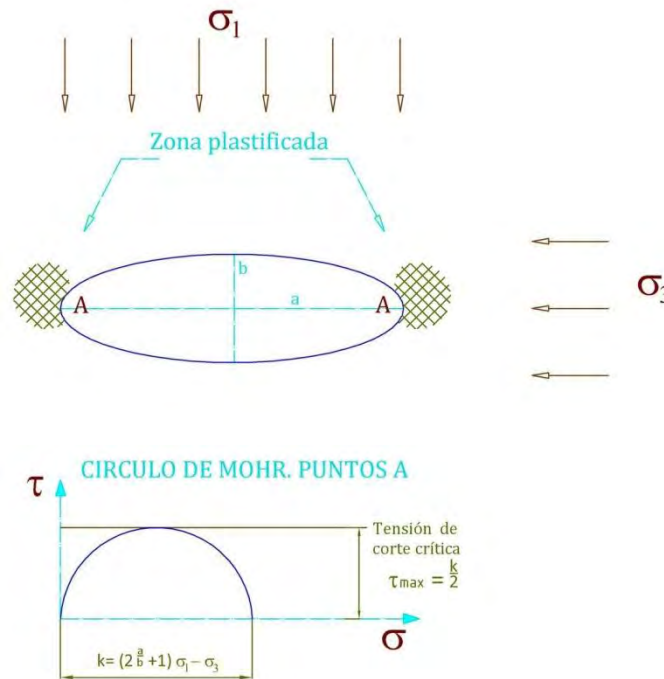


Fig. 3.4: Condición para el inicio de la rotura plástica. (Modificada de Uriel y Bravo, 1970).

La envolvente de Mohr para la iniciación de la rotura plástica (Fig. 3.3) es:

$$\tau = \frac{-\frac{a}{b}\sigma + \frac{K}{2}}{\sqrt{2\frac{a}{b} + 1}}$$

Si una roca está sometida a una compresión isotrópica ($\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_E$), se produce una compresión igual a $2\frac{a}{b}\sigma_E$, en los bordes de cualquier grieta.

Si se alcanza el valor K de compresión máxima en la compresión isotrópica, es decir,

si $2 \frac{a}{b} \sigma_E = K$ se producirá una consolidación isótropa del material.

Si para un valor determinado de la tensión principal menor σ_3 , se aumenta el desviador, se alcanza un nivel de tensiones para el cual el círculo de Mohr correspondiente es tangente a una de las dos líneas anteriores (línea A y línea B en la Fig. 3.3). Si primero se hace tangente a la línea A, la rotura es de tipo frágil; esto ocurrirá para valores de σ_3 pequeños. En el caso contrario, si el círculo es primero tangente a la línea B se producirá el comienzo de la plastificación y por lo tanto la rotura final será plástica. Este caso se dará cuando σ_3 sea grande y normalmente próximo a la tensión de consolidación isótropa.

b. Material de estudio

Para verificar la hipótesis sobre las condiciones de iniciación de la rotura frágil y plástica (Fig. 3.3), los autores llevaron a cabo ensayos con probetas de cemento de baja densidad y porosos, con una densidad media del cemento de 1.

c. Ensayos y resultados

Los autores realizaron ensayos triaxiales (con presiones de confinamiento, ζ_3 , hasta 100 kg/cm².) de 2 tipos, por un lado, ensayos triaxiales a compresión isótropa hasta rotura, y por otro, con compresión isótropa iniciales y posterior aplicación de un desviador.

I. Ensayos de compresión isótropa hasta rotura:

En estos ensayos los autores observaron que para bajas presiones la curva era casi una línea recta (comportamiento elástico), pero cuando alcanzaba una presión crítica se producía el colapso de la estructura (se apreciaba un cambio brusco en la pendiente). El valor de la presión de colapso estaba entre 68 a 85 kg/cm².

II. Ensayos triaxiales, con desviador hasta rotura:

En los ensayos triaxiales se observó que para valores pequeños de la presión de confinamiento, ζ_3 , se producía una rotura del tipo frágil (se observaron la presencia de fisuras en las probetas), mientras que para altos valores de ζ_3 la rotura era de tipo plástico (Fig. 3.5).

En la Tabla 3.1 se resumen los resultados obtenidos en los diferentes ensayos llevados cabo por Uriel y Bravo, en probetas de cemento de baja densidad.

Tabla 3.1: Resultados medios obtenidos en los ensayos en probetas de cemento de baja densidad. (Uriel y Bravo, 1970).

σ_t (kp/m ²)	σ_c (kp/m ²)	P_c (kp/m ²)
5	23.1	68-85

Los resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en la Fig. 3.5. En esta figura se observa que, aunque el material usado resultó ser heterogéneo, los valores medios (de acuerdo con las fórmulas de las líneas de rotura para el comienzo de la rotura frágil y para la plastificación), siguen una ley similar a la deducida anteriormente (Fig. 3.3).

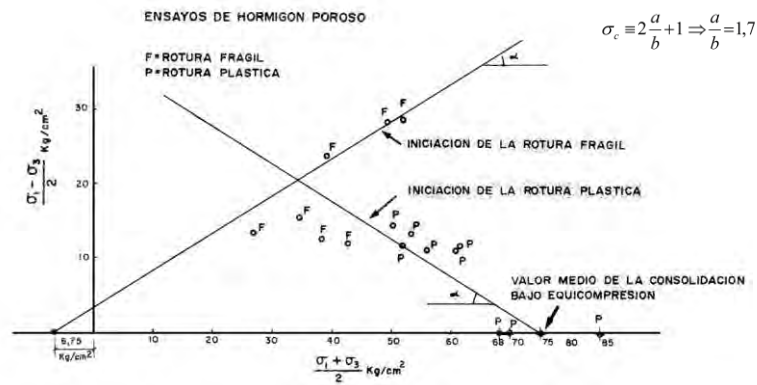


Fig. 3.5: Rotura plástica y frágil en hormigón poroso.

3.2.1.2 Año 1971

a. Introducción

Posteriormente, Uriel y Bravo (1971) realizaron ensayos en aglomerados volcánicos de baja densidad con el fin de fijar las condiciones tensionales bajo las cuales se produce la destrucción o degradación de la estructura natural del suelo.

Para determinar si en este tipo de materiales existían las dos envolventes descritas en el año 1970, los autores efectuaron dos tipos de ensayos:

1. Compresión isótropa en la que se midió la deformación longitudinal experimentada. La degradación del material se advierte al llegar a una tensión en la que tiene lugar un cambio brusco en el gradiente de las deformaciones. Este punto es el punto de ordenada nula de la línea de rotura plástica.
2. Compresión triaxial aplicando un desviador y midiendo las deformaciones longitudinales de las probetas. Al alcanzarse un determinado nivel en la tensión desviadora se suele advertir un cambio en el módulo de deformación de la muestra, producido por la desimbricación de los granos del aglomerado.

b. Material de estudio

Los materiales ensayados pertenecen a la formación Roque Nublo, de edad Pliocena (5,5 a 2,7 Ma). Esta formación representa el segundo ciclo de actividad magmática en la isla de Gran Canaria (Foto 3.1 y Fig. 3.6).

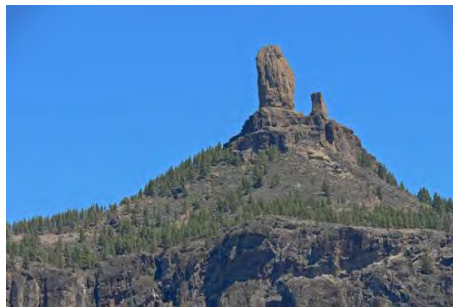


Foto 3.1: Estratovolcán del Roque Nublo. Gran Canaria.

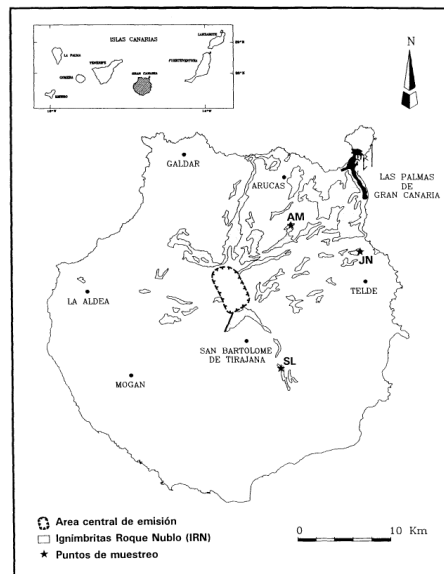


Fig. 3.6: Distribución de las ignimbritas Roque Nublo en Gran Canaria (modificado de ITGE, 1992). [44].

Se trata de un aglomerado tefrítico de color pardo amarillento, poco litificado y de baja densidad. Además, el material desmenuzado es no plástico.

En la Tabla 3.2 se recogen las principales características geotécnicas del material ensayado.

Tabla 3.2: Características de los aglomerados.

γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Índice de poros (e)	Humedad (%)	Grado de saturación (%)
13	28.6-28.8	0.97-1.41	30-41.5	85

c. Ensayos y resultados

Los ensayos estaban orientados a fijar las condiciones tensionales bajo las cuales se produce la destrucción o degradación de la estructura natural del suelo. Para determinar si en este tipo de material existían las dos envolventes (Uriel y Bravo, 1970), los autores efectuaron dos tipos de ensayos, los cuales fueron los mismos que anteriormente (1970):

- Ensayos de compresión isótropa hasta rotura
- Ensayos triaxiales, con desviador hasta rotura.

Ensayos de compresión isótropa hasta rotura:

En primer lugar, ensayos de compresión isótropa sobre las probetas con su humedad

natural y con medida de las deformaciones longitudinales. En estos ensayos, si al llegar a una cierta tensión se producía un cambio brusco en el gradiente de las deformaciones, esa tensión era el punto de ordenada nula de la línea de rotura plástica. La destrucción de la estructura tenía lugar a presiones entre 27,2 y 35,0 kg/cm² (Fig. 3.7).

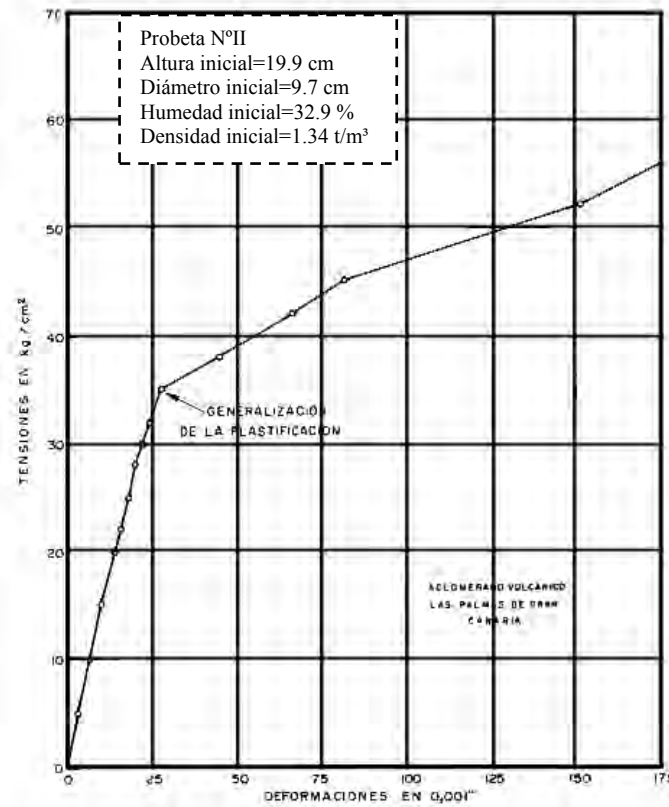


Fig. 3.7: Resultado compresión isotropa. Probeta N°2. (Uriel y Bravo, 1971).

Ensayos triaxiales, con desviador hasta rotura:

Asimismo, se realizaron ensayos triaxiales, aplicando en primer lugar una presión de consolidación baja a la muestra y a continuación un desviador hasta rotura, sobre las probetas con humedad natural y midiendo las deformaciones longitudinales con el fin de obtener la línea de rotura frágil. En dicha rotura se producía la desintegración de los granos y la rotura, por tanto, de la estructura del material. Por otra parte, también se realizaron ensayos triaxiales con presiones de confinamiento elevadas pero menores que la presión de colapso. En estos ensayos la línea media tiene una pendiente que se acerca a los 45° respecto al eje de tensiones normales, lo que parece indicar, por lo menos a efectos prácticos, que la degradación tiene lugar cuando la tensión principal mayor alcanza un valor análogo a los indicados para la compresión isotropa. (Fig. 3.8).

En la Tabla 3.3 se recogen los resultados de los ensayos triaxiales para el caso de rotura frágil.

Tabla 3.3: Resultados de los ensayos triaxiales, para el caso de rotura frágil (Uriel y Bravo, 1971).

Densidad media (Tm/m ³)	Humedad inicial % (media)	Cohesión kg/cm ²	Ángulo de rozamiento
1,36	35,1	4,27	33,8
1,30	33	5,33	15,7
1,23	39,3	1,90	27,5
1,34	30,6	0,36	33,7

Por otra parte, los autores comprobaron también que la destrucción de la estructura natural del suelo, remoldeando la muestra a una densidad similar a la natural, da lugar a una importante pérdida de la cohesión, sin llegar a ser total, pasando de 1.49 kg/cm² a 0.36 kg/cm², y una disminución apreciable en el ángulo de rozamiento interno, pasando de 42° a 33.7°.

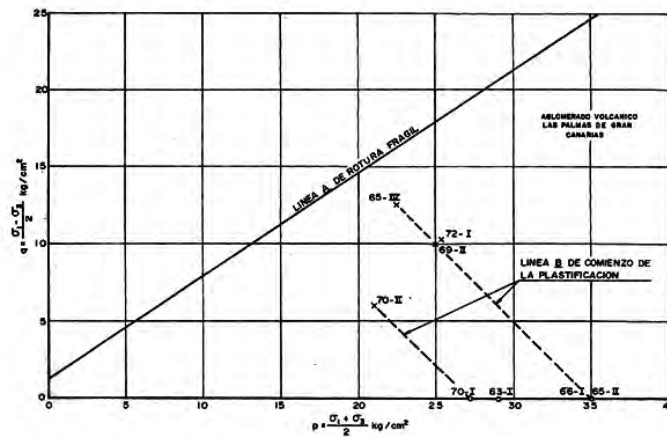


Fig. 3.8: Resistencia a la degradación. (Uriel y Bravo, 1971).

3.2.1.3 Año 1973

a. Introducción

Uriel y Serrano (1973), por un lado, exponen una teoría sobre las condiciones para las cuales se produce el colapso de la estructura de determinados materiales similares a los que aparecen en la cimentación de las presas de Ariñez y Campitos (Tenerife). Por otro lado, los autores realizaron una serie de ensayos con el fin de determinar las condiciones de esfuerzos bajo las cuales se produce el colapso de la estructura.

La teoría propuesta por los autores es similar a la expuesta por Santiago Uriel, en el año 1971 (rocas porosas), pero para los suelos cementados. Para poder poner de relieve los diversos factores que influyen en el colapso, los autores tuvieron que realizar ciertas hipótesis, algunas de las cuales fueron:

1. El suelo colapsa cuando se rompen los enlaces debidos al material cementante.
2. Hasta el colapso el suelo puede considerarse elástico con un módulo E_m y un coeficiente de Poisson, μ .
3. Los enlaces del material cementante, tienen las siguientes dimensiones medias: anchura $2L$ y longitud L .

La Fig. 3.9 indica las relaciones tensionales que producen uno u otro tipo de rotura. Cabe señalar que la rotura por esfuerzo cortante se presenta solamente para enlaces en los que la relación entre anchura $2L$ y longitud L es grande, es decir, que se trata de enlaces cortos y anchos. Por el contrario, si los enlaces son largos y estrechos solamente puede originarse el colapso por tracción o compresión, como sucede en el caso de rocas porosas.

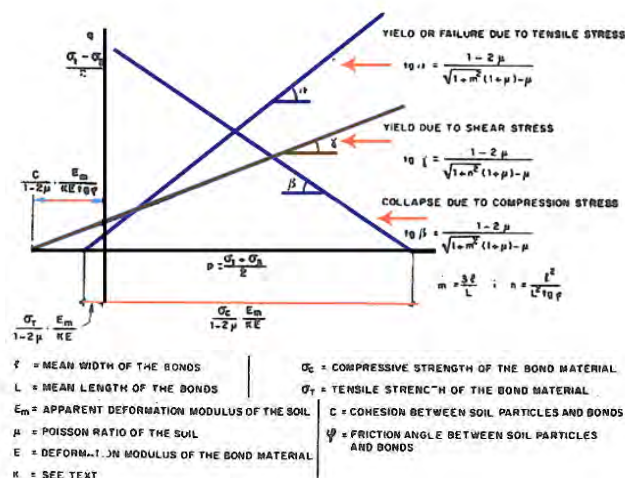


Fig. 3.9: Relación p-q que produce el colapso. (Modificada de Uriel y Serrano, 1973)

b. Material de estudio

Los materiales ensayados son dos tipos de aglomerados volcánicos de muy baja densidad procedentes, como se ha indicado, de las zonas de cimentación de las presas de Ariñez y de Campitos (Tenerife).

En el caso del aglomerado de Campitos, se trata de un material constituido en su mayor parte por tobas híbridas alteradas de lapilli y cinerita con matriz en parte arenosa arcillosa. El material piroclástico es de tipo pumítico basáltico y contiene abundantes productos de naturaleza criptocristalina amorfa.

El aglomerado de Ariñez está constituido por fragmentos de tefrita incluidos en una gran masa de microcristales de piroxenos, plagioclasas y feldespatos con un cemento de metahaloisita y montmorillonita y otros minerales arcillosos en una proporción menor del 4%.

c. Ensayos y resultados

Los ensayos de laboratorio realizados fueron, al igual que en los estudios anteriores (Uriel y Bravo, 1970 y 1971), los siguientes:

1. Compresión isótropa hasta rotura:

Los resultados que obtienen son similares a los obtenidos anteriormente por Uriel y Bravo (1971), como se observa en la Fig. 3.10. Como puede verse en dicha figura, para niveles inferiores a una cierta tensión crítica P_c , el comportamiento del material es casi elástico y lineal. A partir de la presión P_c , se observa en la figura cómo se produce un cambio brusco en la deformabilidad, ocasionado por la destrucción de la estructura del suelo.

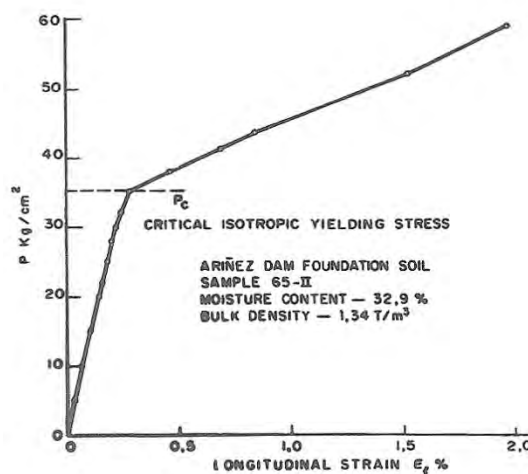


Fig. 3.10: Relación esfuerzo-deformación bajo compresión isótropa. (Uriel y Serrano, 1973).

En la Tabla 3.4 se recogen los rangos de valores obtenidos en estos ensayos.

Tabla 3.4: Resultados de los ensayos de compresión isotrópica (Uriel y Serrano, 1973).

Propiedades (MPa)	Ariñez	Los Campitos
Presión isotrópica de colapso	2.72-3.5	1.4 – 1.8
Módulo deformacional antes del colapso	300 – 800	120 – 600
Módulo deformacional después del colapso	12 – 100	20 – 70
Módulo deformacional in situ	1400 – 2800	900 - 1800

2. Compresión triaxial, con desviador hasta rotura:

Los autores encontraron dos tipos de comportamiento bajo un desviador creciente para cargas de consolidación, ζ_3 , inferiores a la tensión crítica P_c .

- Carga de consolidación alta pero inferior a P_c (Fig. 3.11):

Como se observa en la figura, el material presenta inicialmente un comportamiento elástico, para valores del desviador inferiores a un determinado valor, q_i ($q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$), límite inferior del desviador de colapso. Existe, asimismo, un valor q_c , límite superior del desviador de colapso, a partir del cual la deformabilidad se hace muy elevada. Entre ambos límites, q_i y q_c , existe una zona de transición en la que se va produciendo la destrucción de la estructura, ya que se va produciendo un cambio gradual de la deformabilidad del material. Por otra parte, hay un valor máximo, q_f , a partir del cual se produce la rotura total.

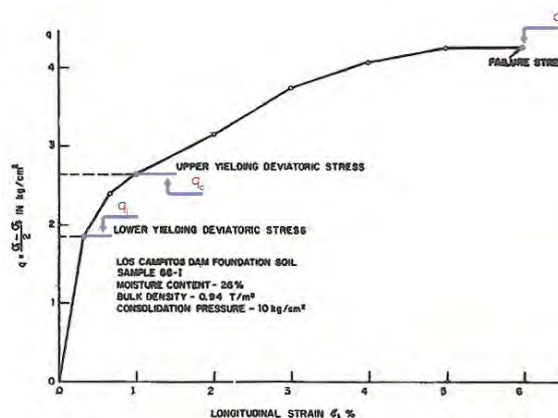


Fig. 3.11: Diagrama q - ϵ con tensión desviadora bajo altas presiones de consolidación. (Uriel y Serrano, 1973).

ii. Carga de consolidación pequeña (Fig. 3.12):

Si la carga de consolidación es pequeña no existe la zona de transición observada en la figura anterior. Como puede verse en la Fig. 3.12, en este caso la rotura se produce de forma brusca (rotura frágil) al alcanzar el desviador ($q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$) un determinado valor q_f , con un cambio brusco en la deformabilidad del material.

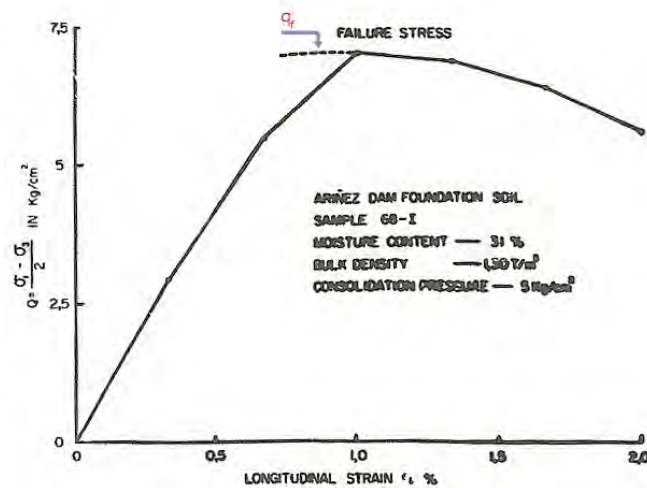


Fig. 3.12: Relación tensión-deformación bajo tensión desviadora y presión de preconsolidación baja. (Uriel y Serrano, 1973).

En las Fig. 3.13 y Fig. 3.14 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales para la presa de Campitos y la de Ariñez, respectivamente, en un diagrama p, q , siendo p y q los parámetros de Hill ($q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$).

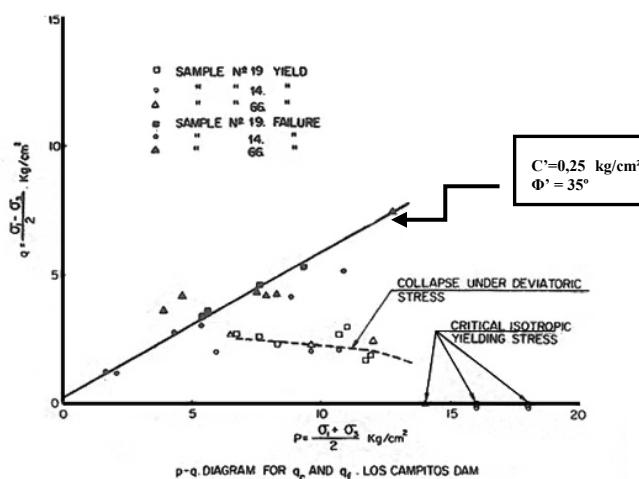


Fig. 3.13: Diagrama $p-q$. Presa de Los Campitos. (Uriel y Serrano, 1973).

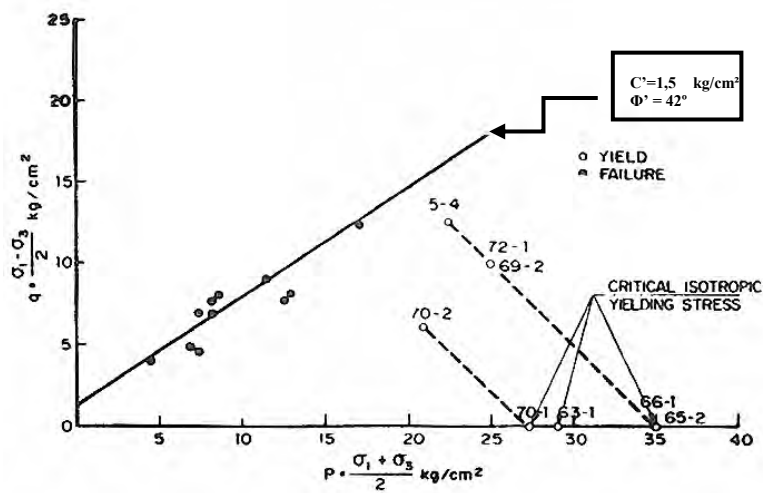


Fig. 3.14: Diagrama p-q. Presa Ariñez. (Uriel y Serrano, 1973).

Como puede observarse en la Fig. 3.13 y Fig. 3.14 de los resultados de estos ensayos también parecen deducirse más líneas de rotura frágil y plástica, similares a las definidas anteriormente.

3.2.1.4 Año 1976

a. Introducción

Serrano (1976) estudia el comportamiento de los aglomerados volcánicos desde el punto de vista teórico y lleva a cabo un análisis energético a través del cual dibuja las líneas de colapso (o leyes de resistencia) para estos materiales.

Los aglomerados volcánicos de baja densidad presentan un comportamiento mecánico singular, ya que para bajas presiones su comportamiento es similar al de una roca con un elevado módulo de deformabilidad, mientras que para altas presiones se produce la destrucción de la estructura que da lugar a una gran deformación y por tanto a un bajo módulo de deformabilidad. A este fenómeno se le denomina colapso mecánico.

b. Material de estudio

Para comparar los resultados obtenidos con los análisis teóricos y energéticos, el autor utiliza los datos del estudio llevado a cabo en el año 1973 por Uriel y Serrano, por tanto se trata de aglomerados volcánicos de baja densidad.

c. Ensayos y resultados

A continuación se describen los diferentes ensayos realizados y sus curvas típicas (Serrano, 1976).

Ensayos de compresión isótropa hasta rotura:

En las curvas de compresión isótropa (Fig. 3.10), se observan 2 ramas definidas, la primera con un módulo de deformabilidad muy alto (E_r) y la segunda con un módulo más bajo (E_s). El cambio se produce para una presión P_c que es la presión de colapso. Esta se produce para una deformación generalmente menor al 0.5%.

Ensayos de compresión triaxial, con desviador hasta rotura:

En cuanto a los ensayos triaxiales, el autor distingue dos tipos de ensayos, como se había hecho anteriormente:

- Triaxiales a alta presión de consolidación (Fig. 3.11):

Denomina así a los ensayos cuya presión de consolidación es superior al 33% de la carga P_c de colapso isótropo.

En este ensayo se encuentran tres valores del desviador, como se indicó anteriormente, que tienen gran significación y que Serrano (1976) describe de la forma siguiente (Fig. 3.11):

- Un valor q_i hasta el cual el material mantiene constante su módulo inicial E_r de deformabilidad. Se le llama desviador crítico inferior.
- Un valor q_c , en el cual se ha producido ya todo el cambio de deformabilidad. El módulo entre q_i y q_c disminuye rápidamente. A partir de q_c vuelve a mantenerse prácticamente constante. A q_c se le llama desviador crítico superior.
- Un valor q_f , para el cual se produce la rotura del material y el desviador ya no aumenta más.

Los desviadores críticos q_i y q_c se consiguen con deformaciones inferiores al 1%. El desviador de rotura q_f aparece para deformaciones del 5% o más.

- Triaxiales a baja presión de consolidación (Fig. 3.12):

En este caso el módulo de deformación se mantiene prácticamente constante hasta llegar a la carga de rotura, la cual se produce con una pérdida de resistencia muy notable. La deformación de rotura no supera al 1% en general.

A partir de los resultados anteriores, Serrano (1976) plantea el esquema teórico de comportamiento reflejado en la Fig. 3.15, en función de los parámetros p y q , en este caso parámetros de Cambridge ($p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$).

Como puede observarse en la Fig. 3.15, existe un dominio en el espacio q - p de tensiones que contiene al origen, dentro del cual el material se comporta en un proceso de carga normal como casi-elástico. Para tensiones dentro de ese dominio el aglomerado es una roca. El contorno es la línea inferior de colapso. Cuando las tensiones alcanzan esa línea se produce la iniciación de la destrucción de la estructura del material.

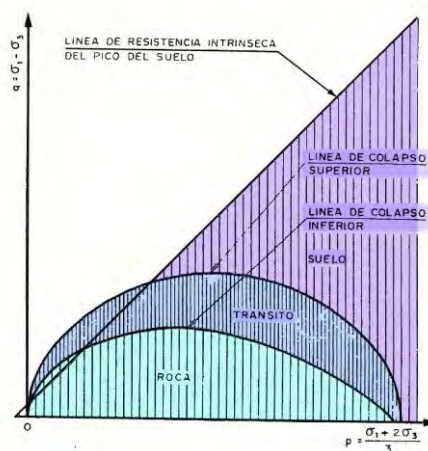


Fig. 3.15: Dominios de comportamiento. (Serrano, 1976).

Al pasar la trayectoria de tensiones la línea inferior de colapso se entra en la zona de transición, la cual está a su vez limitada por la línea superior de colapso. Dentro de la zona de transición se produce la rotura de los enlaces. Cuando las tensiones alcanzan la línea de colapso superior se ha producido la total destrucción del material, el cual es ahora realmente un suelo, a partir de entonces el material se comportará como tal y tendrá por lo tanto una línea de resistencia intrínseca de pico y otra residual.

Existen unos puntos notables sobre la línea superior de colapso (que también podrían reconocerse en la línea inferior de colapso), Fig. 3.16, que tienen un gran significado intrínseco.

El punto C, representa la tensión isotrópica crítica.

El punto P es aquel de la curva de colapso al que le corresponde una tangente horizontal. Si se acepta el postulado de estabilidad de Drucker (1959), entre P y C el comportamiento del suelo resultante sería estable con rigidización energética, ya que se produciría una disminución de volumen durante los procesos de plastificación. Si se acepta el postulado de estabilidad, como hace Mitchell y otros (1975) admitiendo una desviación respecto a la ley de la normalidad, el punto P que corresponde a una variación volumétrica nula, ya no sería el de tangente horizontal.

El punto F corresponde a la intersección de la línea de colapso superior con la línea de resistencia de pico del suelo. Entre P y F, se produce un reblandecimiento energético ya que aquí se produce un aumento de volumen.

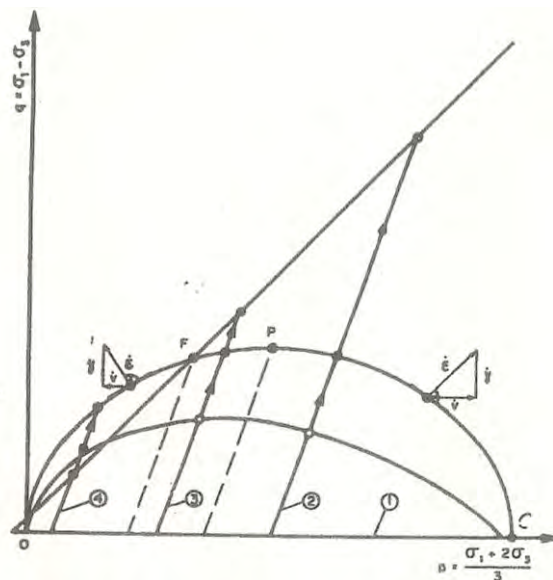


Fig. 3.16: Tipos de trayectorias de tensiones. (Serrano, 1976).

Análisis energético:

Serrano (1976) hace un análisis energético planteando que:

$$\Delta T_e = \Delta U + \Delta W_i$$

Donde:

ΔT_e = es el incremento de trabajo externo.

ΔU = es el incremento de energía interna.

ΔW_i = es el incremento de trabajo plástico consumido en la rotura.

La parte de trabajo externo ΔW_e empleado en la rotura puede valorarse por:

$$\Delta W_e = \Delta T_e - \Delta U = \Delta W_i$$

Expresado en función de las deformaciones plásticas:

$$\Delta W_e = p dv^p + q d\gamma^p$$

Donde p y q son los parámetros de Cambridge para ensayos triaxiales y $p dv^p$ es el incremento volumétrico plástico, $q d\gamma^p$ es el incremento de distorsión plástica.

$$dv^p = \frac{d\varepsilon_1^p + 2d\varepsilon_3^p}{3}$$

$$d\gamma^p = d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p$$

$$\Delta W_i = F(p, dv^p, q, d\gamma^p)$$

$$\Delta W_i = \Delta W_e$$

$$p dv^p + q d\gamma^p = F(p, dv^p, q, d\gamma^p)$$

Dependiendo de la expresión que se adopta para la función F se encuentran distintos modelos para suelo colapsables mecánicamente. La función F ha de ser siempre positiva.

El grupo de Cambridge (Roscoe y Burland, 1968) ha utilizado, con éxito, para arcillas blandas dos modelos:

Arcilla de Cam-Clay: $F = M p d\gamma^p$

Arcilla de Burland (1968): $F = p \sqrt{(dv^p)^2 + M^2 (d\gamma^p)^2}$

M es un parámetro de carácter friccional.

Aunque el comportamiento de una arcilla blanda puede parecer que está muy alejado de los piroclastos, su plastificación puede interpretarse como un proceso de colapsos sucesivos que sufre su estructura, (en cada momento la presión de consolidación es la presión de colapso).

Ahora bien, mientras que en las arcillas blandas la deformación se produce homogéneamente debido a la propia homogeneidad e isotropía de las muestras, no pasa lo mismo con los aglomerados. Por esta razón, Serrano (1976) introduce una pequeña modificación a la función de consumo de Burland (1968):

$$\Delta W_i = \lambda p \sqrt{(dv^p)^2 + M^2(d\gamma^p)^2} \quad (1)$$

El parámetro λ tiene el valor 1 en el estado final de rotura de la estructura y el valor $\lambda_i = \lambda_i(\varepsilon)$, siendo $\varepsilon = q/p$, al iniciarse la misma.

Líneas de colapso:

En la Fig. 3.17 se representa un esquema de las líneas de colapso.

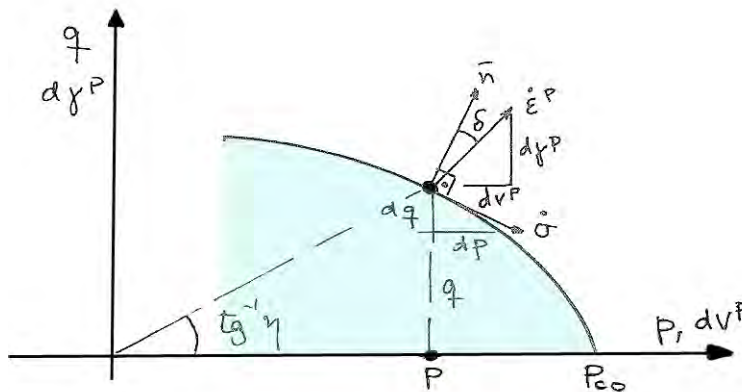


Fig. 3.17: Esquema de la línea de colapso. (Serrano, 1976).

Operando se obtiene la ecuación diferencial de las líneas de colapso:

$$\frac{dq}{dp} = \alpha - \frac{\lambda^2 M^2 - \eta^2}{\eta} \frac{1}{1 + \lambda \sqrt{1 + (1 - \lambda^2) \frac{M^2}{2}}}$$

Wong y Mitchell (1975) han encontrado que dentro de un intervalo muy amplio de ε ($-0.5 < \varepsilon < 0.75$) el valor de α es casi constante e igual a 0.25 en el caso de las arcillas cementadas sensitivas. Las leyes de variación de α no se conocen todavía para el caso de los aglomerados volcánicos. Por el momento y solo por simplicidad de cálculo se adopta $\alpha=0$, es decir, que se admite que se verifica la ley de la normalidad.

Con $\lambda=1$ se obtiene la curva de colapso superior:

$$\left(p - \frac{p_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{q}{M}\right)^2 = \left(\frac{p_c}{2}\right)^2$$

En la Fig. 3.18 se muestra un ejemplo de las curvas de colapso, particularizadas para los valores $M=0.8$ y $\lambda=1, 0.9$ y 0.8 .

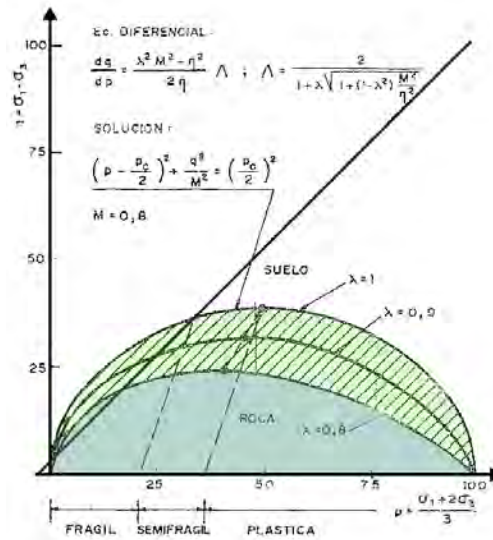


Fig. 3.18: Líneas de colapso. (Serrano, 1976).

Los resultados experimentales obtenidos en los materiales de Los Campitos y Ariñez no permiten constatar con seguridad esta teoría ya que los resultados fueron muy dispersos debido a la heterogeneidad de los materiales. De todas manera, en la Fig. 3.19 se ha dibujado, para el caso de Ariñez, los valores correspondientes a las cargas críticas inferiores de colapso y las cargas de rotura final, así como la línea de colapso superior que resulta tomando $M=0.8$.

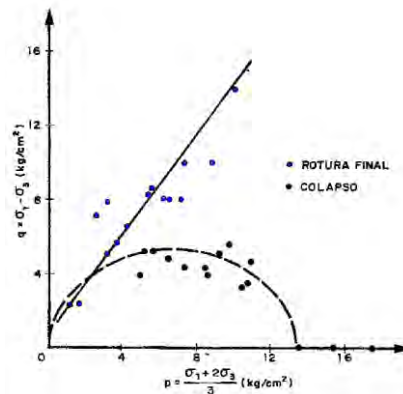


Fig. 3.19: Resultados de los ensayos realizados con muestras de aglomerados volcánicos procedentes de la zona de cimentación de la presa de los Campitos. (Serrano, 1976).

3.2.1.5 Año 1997

a. Introducción

En el año 1997, Serrano realiza unos cambios en las ecuaciones energéticas expuestas en el año 1976, tal y como se desarrolla a continuación.

b. Desarrollo matemático

Hasta ese momento se habían planteado dos tipos de modelos teóricos en relación con el colapso:

Los *modelos estructurales*: Uriel y Bravo (1970), Uriel y Serrano (1972) y,

Los *modelos energéticos*: Serrano (1976), Serrano (1996).

Serrano (1997), en su libro de “Mecánica de Rocas” (1997), plantea algunos cambios en el modelo matemático del año 76, fundamentalmente en la expresión de la ley de consumo. En resumen, el planteamiento queda del modo siguiente:

- *Ecuación del consumo de energía*:

El trabajo externo de rotura ΔT_p dado por $\Delta T_p = p dv^p + q d\gamma^p$, puede ponerse en una forma más útil:

$$\Delta T_p = p d\gamma^p [\psi + \eta]$$

En donde las variables ψ y η ya definidas en el planteamiento anterior son:

$$\psi = \frac{dv^p}{d\gamma^p}; \eta = \frac{q}{p}$$

siendo Ψ la razón de dilatación plástica y ϵ la oblicuidad de la tensión.

El consumo de energía en la rotura ΔW_p se puede poner como

$$\Delta W_p = p d\gamma^p F^*(\psi, \eta)$$

Igualando la parte del trabajo externo ΔT_p empleada en la rotura y el consumo interno en la rotura ΔW_p se obtiene la “Ley del consumo de energía”:

$$\psi + \eta = F^*(\psi, \eta)$$

Con estos parámetros la ecuación de consumo de Roscoe y Burland (1968) tendría la siguiente forma:

$$F^* = \sqrt{\psi^2 + M^2}$$

Y con la función $\lambda(\epsilon)$, que evalúa en alguna medida el grado de heterogeneidad en

relación a una cierta trayectoria de tensiones, la ley de consumo para las rocas macroporosas puede expresarse de forma más general que la de las arcillas blandas:

$$F^* = \lambda(\eta)\sqrt{\psi^2 + M^2}$$

- Ecuación diferencial general de las líneas de colapso:

La ley de fluencia plástica, puede reescribirse en la forma:

$$\frac{dq}{dp} + \psi - \alpha = 0$$

Donde $\alpha = \frac{a}{dpd\gamma^p} \geq 0$

- Líneas de colapso:

Teniendo en cuenta la ley de consumo anterior realizando un cambio de variable se integra la ecuación anterior y se obtienen las ecuaciones paramétricas de las líneas de colapso:

$$\frac{p}{p_{co}} = k N(\theta) \frac{E(\theta)}{1 - b \cos \theta}$$

$$\eta = M \frac{\lambda - \sin \theta}{\cos \theta}$$

Siendo:

$$N(\theta) = \cos \theta \left(\frac{1 + \sin \theta}{\cos \theta} \right)^{1/\lambda}$$

$$E(\theta) = \exp \left[\frac{2b}{\lambda\sqrt{1-b^2}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{1+b}{1-b}} \tan \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad \text{Para } b = \frac{\alpha}{M\lambda} < 1$$

$$E(\theta) = \exp \left[\frac{2b}{\lambda\sqrt{b^2-1}} \ln \frac{\sqrt{b+1} \tan \frac{\theta}{2} - \sqrt{b-1}}{\sqrt{b+1} \tan \frac{\theta}{2} + \sqrt{b-1}} \right] \quad \text{Para } b > 1$$

$$E(\theta) = \exp \left[\frac{-1}{\lambda} \cot \frac{\theta}{2} \right] \quad \text{Para } b=0$$

En el caso de materiales con ley de fluencia asociada y con $\lambda=1$ se obtiene la línea de colapso superior:

$$\frac{p}{p_{co}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\eta}{M} \right)^2}$$

que es otra forma de la ecuación de la elipse:

$$\left(\frac{p}{p_{co}/2} - 1\right)^2 + \left(\frac{q}{Mp_{co}/2}\right)^2 = 1$$

Ya dada por Roscoe y Burland (1968) para las arcillas blandas.

En las Fig. 3.20 a Fig. 3.21 se muestran algunas curvas de colapso para distintas condiciones de M.

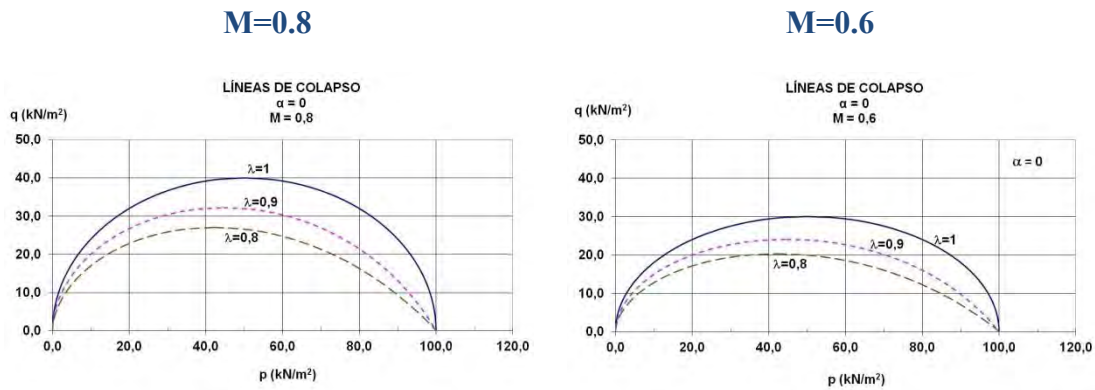


Fig. 3.20: Líneas de colapso para $\alpha=0$ (Serrano, 1997).

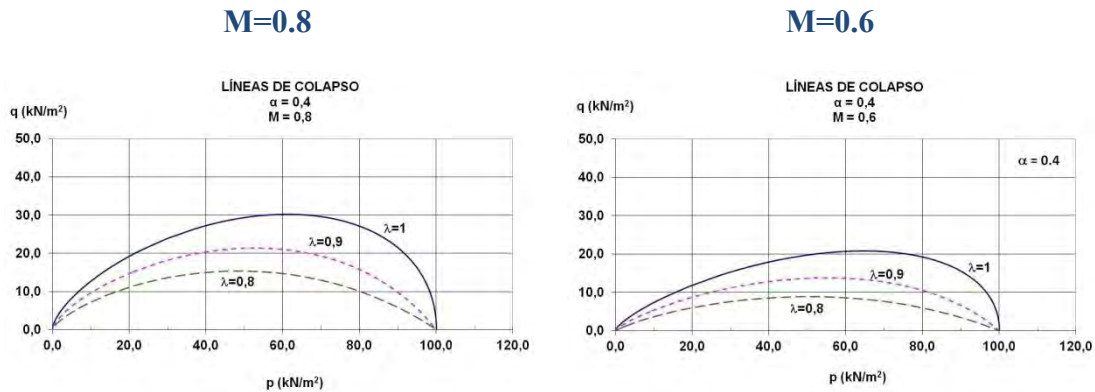


Fig. 3.21: Líneas de colapso para $\alpha=0.4$ (Serrano, 1997).

3.2.1.6 Años 1998 a 2002

Serrano y Olalla (1998) y Serrano et al (2002 a y b) retoman posteriormente los trabajos anteriores y concluyen que el comportamiento geomecánico de estos materiales depende de los cinco factores siguientes: compacidad, alteración, soldadura, imbricación y resistencia de las partículas.

Los autores señalan que la imbricación de las partículas está relacionada con el número de contactos de una partícula con las que la rodean, mientras que la soldadura está relacionada con el porcentaje de áreas de contactos soldados de una partícula respecto al área total de la misma. En relación a estos conceptos proponen la clasificación provisional que se recoge en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Grado de imbricación (I) y soldadura (w). Serrano et al, 2002a.

<div>Soldadura</div> <div>Imbricación</div>	Suelto < 5%	Poco soldado 5-15%	Soldado 15-45%	Muy soldado > 45°
Baja < 8 contactos	IS 1-1	IS 1-2	IS 1-3	IS 1-4
Media 8-12 contactos	IS 2-1	IS 2-2	IS 2-3	IS 2-4
Alta > 12 contactos	IS 3-1	IS 3-2	IS 3-3	IS 3-4

En la Fig. 3.22 se muestran los resultados de ensayos de resistencia a compresión simple realizados con piroclastos de densidades muy diversas procedentes de diferentes puntos de las islas Canarias. Como señalan los autores, la envolvente superior de los puntos crece de forma muy marcada con la densidad, mientras que la envolvente inferior también lo hace, aunque de forma menos marcada. Asimismo, indican que la dispersión en esta relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca debe estar relacionada con el grado de imbricación y soldadura de las partículas.

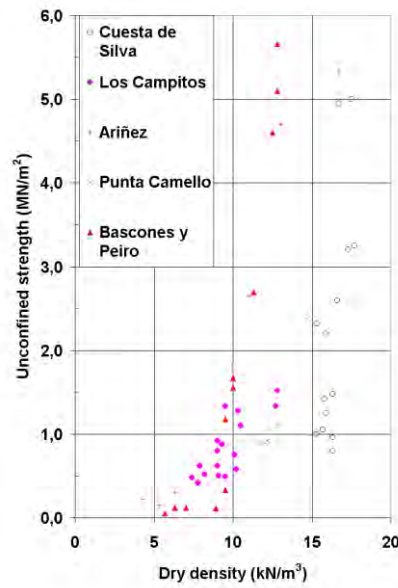


Fig. 3.22: Resistencia a compresión simple en función de la densidad seca. Muestras procedentes de diferentes puntos de las Islas Canarias (Serrano et al, 2002b).

Estos autores estudian la resistencia de aglomerados volcánicos en función de su densidad y ajustan el criterio de rotura original de Hoek y Brown (1980) a los resultados de ensayos triaxiales realizados con muestras de aglomerados. Expresan dicho criterio de rotura en función de los parámetros β y δ (Serrano y Olalla, 1994) en la forma:

$$p = \beta \zeta = q + \frac{q^2}{2\beta}$$

Siendo $\beta = \frac{m\sigma_c}{8}$ un “módulo de resistencia” con dimensiones de presión y $\zeta = \frac{8s}{m^2}$ un parámetro adimensional indicativo de la cohesión del material (σ_c = resistencia a compresión simple; m y s= parámetros de Hoek y Brown).

Mediante los ajustes realizados deducen los parámetros que se recogen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Datos deducidos de ensayos triaxiales (Serrano et al, 2002a).

γ (KN/m ³)	β (KN/m ²)	$\zeta \cdot 10^3$	$t \equiv \beta\zeta$ (KN/m ²)	$L \equiv \beta/\gamma$ (m)	m	σ_c (MN/m ²)
10.4	380	210	80	36.5	6.2	0.49
10.4	1000	250	250	96.1	5.7	1.41
9.5	700	100	70	73.7	8.9	0.63
9.4	720	83	60	76.6	9.8	0.59
9.2	700	71	50	76.0	10.6	0.53
8.8	390	46	20	44.3	13.2	0.24
8.2	260	27	7	31.7	15.47	0.38
7.8	240	0	0	30.8	-	0

Los autores proponen, además, unos coeficientes reductores de los parámetros β y δ , n_β y n_δ , para la obtención del valor de dichos parámetros para el macizo rocoso, en función del GSI, con los que obtienen los valores recomendados que se recogen en Fig. 3.23.

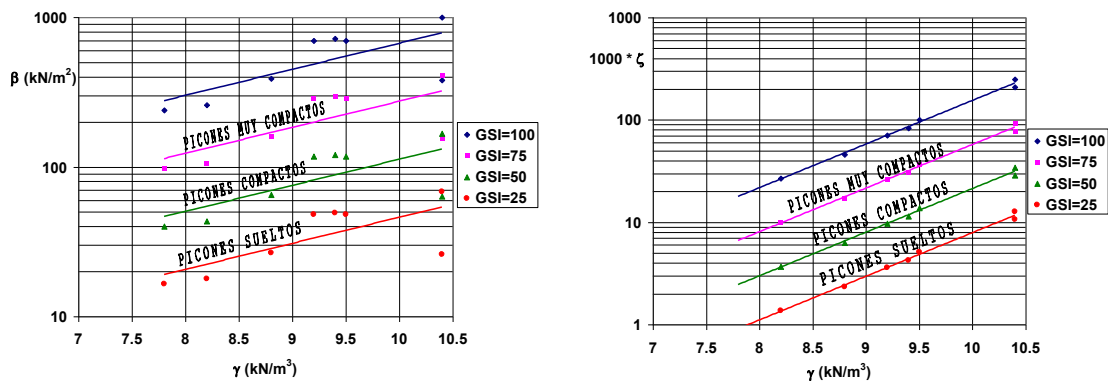


Fig. 3.23: Izqda.: Valor del parámetro β . Drcha.: Valor del parámetro δ . (Serrano et al, 2002a).

Los autores continúan estudiando el comportamiento de taludes en rocas volcánicas (Serrano et al, 2002c), aplicando criterios de rotura no lineales.

3.2.1.7 Año 2006

González de Vallejo et al (2006 y 2008) realizan un extenso estudio de caracterización de los materiales volcánicos de Tenerife a partir de diferentes datos de campo, bibliográficos y estudios geotécnicos. En las Tabla 3.7 y Tabla 3.8 se recogen los resultados.

Tabla 3.7: Resumen de las propiedades geotécnicas de los materiales volcánicos de las Islas Canarias. (González de Vallejo et al, 2008).

Geotechnical properties	G (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	C (MPa)	ϕ (°)	E (GPa)	LL (%)	PL (%)	EI (MPa)	Other
Basalts	-	15-31 (21-28)	25-160 (40-80)	-	40-55	15-30	-	-	-	-
Tuffs	-	8-18 (poorly compacted) 18-25 (compacted)	1-50 < 10 (estimated)	0-1.45	12-30 (weathered tuffs)	0.1-22	-	-	-	-
Ignimbrites	13 to >20	13 - >20	2-5 (weak) 15-70 (hard)	0.1-2	27-38	30-50 (welded)	-	-	-	-
Agglomerates	-	12-28	0.5-25	≤ 0.4	25-42	0.1-3	-	-	-	-
Pyroclastic fall deposits	22-25	5-18	0-5	≤ 0.1	25-45 (32-38)	0.01-0.1	-	-	-	a (%): 45-65
Volcanic soils Residual soils	22-30	12-13	-	≤ 0.1	23-40	0.510 ⁻⁴ -1110 ⁻³	52-102	15-95	0.02-0.2	ϕ : 1.6-2.88 W (%): 12-180 τ_u : 56-130 kPa γ_{sat} : 5-17.1 kN/m ³ Cc: 0.13-0.24
Transported soils	27-29	11-14	-	-	-	-	15-60	25-45	0.02-0.15	

Indicated are maximum and minimum values. Most common values appear in brackets.
G: specific weight, γ : dry density, σ_c : uniaxial compressive strength, C: cohesion, ϕ : internal friction angle, E: elasticity modulus, LL: liquid limit, PL: plastic limit, EI: expansive index, a: porosity, u: pore index, W: moisture content, τ_u : shear strength, γ_{sat} : maximum Proctor density, Cc: compressibility coefficient.

Tabla 3.8: Resumen de las propiedades de ingeniería geológica de los materiales piroclásticos (González de Vallejo et al, 2008).

Material	Composition	Granulometry- morphology	Structure	Origin	State*					Other geological features
					1	2	3	4	5	
Pyroclastic deposits	Acid (pumice) or basic	Ash <2 mm Lapilli 2-64 mm Blocks, bombs & scoriae >64 mm	Bedded layers, Clinder cones	Pyroclastic fall	XXX	O or XX	O	O	X	Heterogeneous, dis- continuous deposits
Tuffs	Pyroclastic generally of a pumice nature	Lapilli & ash	Homogeneous & continuous	Pyroclastic fall	O	XXX	XX	X	O	Massive, continuous deposits
				Pyroclastic flow	O	X	XXX	XX	O	
Ignimbrites	Pyroclastic major component: pumice	Lapilli & ash	Arranged as flow layers. Entatic texture	Pyroclastic flow	O	O	XXX	XXX	O	Joints and fractures may develop as in flows
Agglomerates & agglomeratic breccias	Pyroclastic or polygenic, Large angular frag- ments in breccias	Unclassified thick, angular, heterometric fragments in fine matrix	Massive and blocky structure	Airfall	XX	XXX	XX	O	XX	Water transport Gravitational sliding
				Lahars	O	X	X	O	XX	
				Avalanches	O	X	X	O	XX	

(*) 1: loose, 2: compact, 3: consolidated, 4: welded, 5: cemented (*), XXX: most common state, XX: Sometimes, X: scarcely, O: never, (*) Since cementation is a post-depositional process, its presence depends on the geochemical conditions of the environment.

3.2.1.8 Año 2007

Serrano et al. (2007a y d) continúan estudiando la resistencia y deformabilidad de los piroclastos de baja densidad, realizando ensayos con nuevas muestras procedentes de diferentes puntos de las islas Canarias. Empleando la clasificación de *Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de canarias* (2011) para estos piroclastos, recogida en la Tabla 3.9, clasifican las muestras y obtienen correlaciones entre diferentes parámetros, algunas de las cuales se recogen en las Fig. 3.24 a Fig. 3.28.

Tabla 3.9: Clasificación de los piroclastos de baja densidad. Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de canarias (2011).

PIROCLASTOS BASÁLTICOS	LAPILLI (LP)	SUELTAS (S)	LPS
		SOLDADAS (T)	LPT
	ESCORIAS (ES)	SUELTAS (S)	ESS
		SOLDADAS (T)	EST
	CENIZAS BASÁLTICAS (CB)	SUELTAS (S)	CBS
		SOLDADAS (T)	CBT
PIROCLASTOS SÁLICOS	PÓMEZ (PZ)	SUELTAS (S)	PZS
		SOLDADAS (T)	PZT
	CENIZAS SÁLICAS (CS)	SUELTAS (S)	CSS
		WELDED (T)	CST

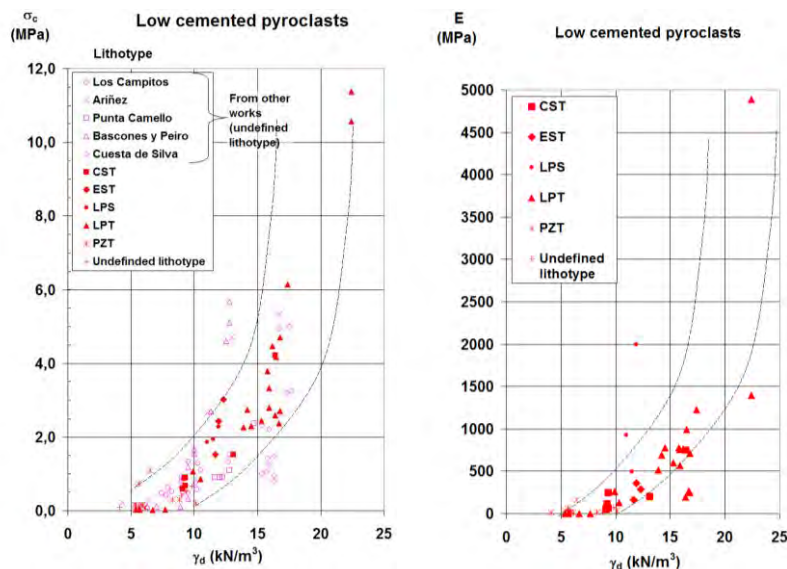


Fig. 3.24: Relación de la resistencia a compresión simple (σ_c , 93 muestras) y del módulo de elasticidad (E, 49 muestras) con la densidad seca (γ_d), en escala natural. Piroclastos de baja densidad. (Serrano et al, 2007a)

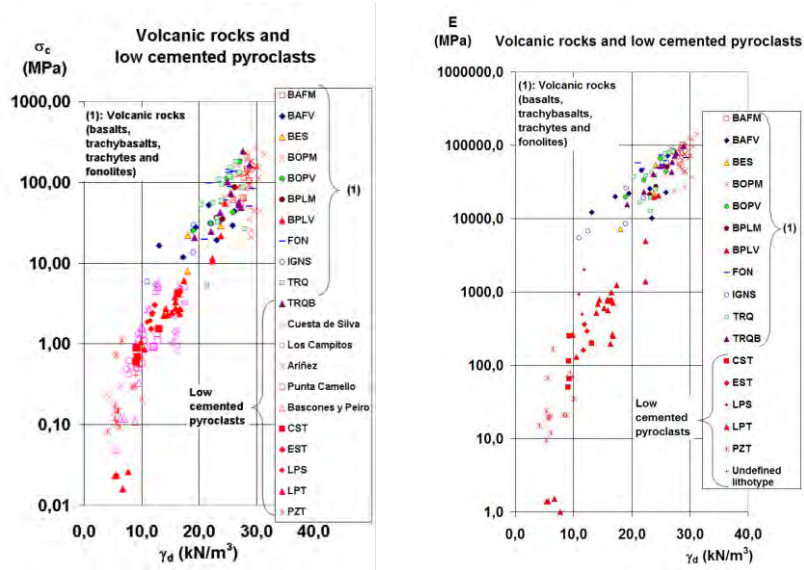


Fig. 3.25: Relación de la resistencia a compresión simple (σ_c , 213 muestras) y del módulo de elasticidad (E , 169 muestras) con la densidad seca (γ_d), en escala logarítmica. Rocas volcánicas ((1): basaltos, fonolitas, traquitas e ignimbritas, notación recogida en Rodríguez-Losada et al. 2007) y piroclastos de baja densidad. (Serrano et al, 2007a).

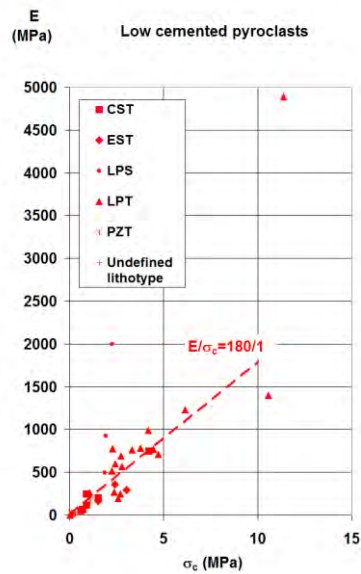


Fig. 3.26: Módulo relativo obtenido con 49 muestras de piroclastos de baja densidad procedentes de diferentes puntos de las islas Canarias. (Serrano et al, 2007a).

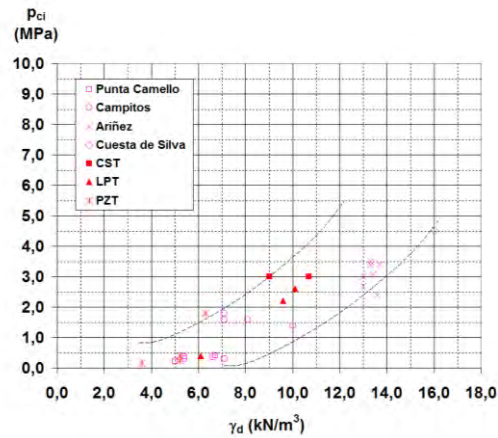


Fig. 3.27: Relación de la presión isotrópica de colapso (p_{ci}) con la densidad seca (γ_d). (Serrano et al, 2007a)

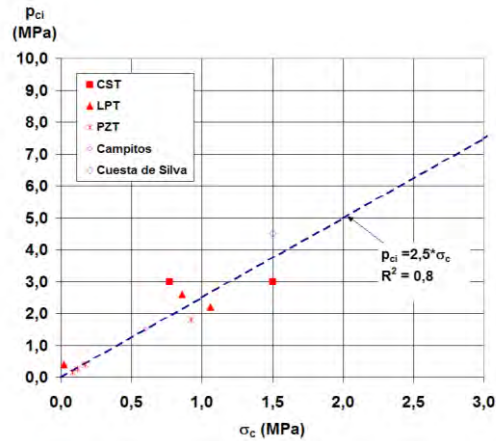


Fig. 3.28: Relación de la presión isotrópica de colapso (p_{ci}) con la resistencia a compresión simple (σ_c). Piroclastos de baja densidad. (Serrano et al, 2007a).

Los autores continúan estudiando la estabilidad de taludes en este tipo de materiales volcánicos heterogéneos (Serrano et al, 2007e) y los empujes sobre muros de materiales con criterios de rotura no lineal (Serrano et al, 2007f).

Estos autores estudian, junto con otros (Santana et al, 2008), por una parte la relación entre las características químicas-mineralógicas y geotécnicas (Fig. 3.29 y Fig. 3.30) y, por otra, la estructura del material con vistas a investigar su influencia en la resistencia. En relación a dicha estructura, los autores definen los cuatro tipos de porosidad diferentes recogidos en la Foto 3.2.

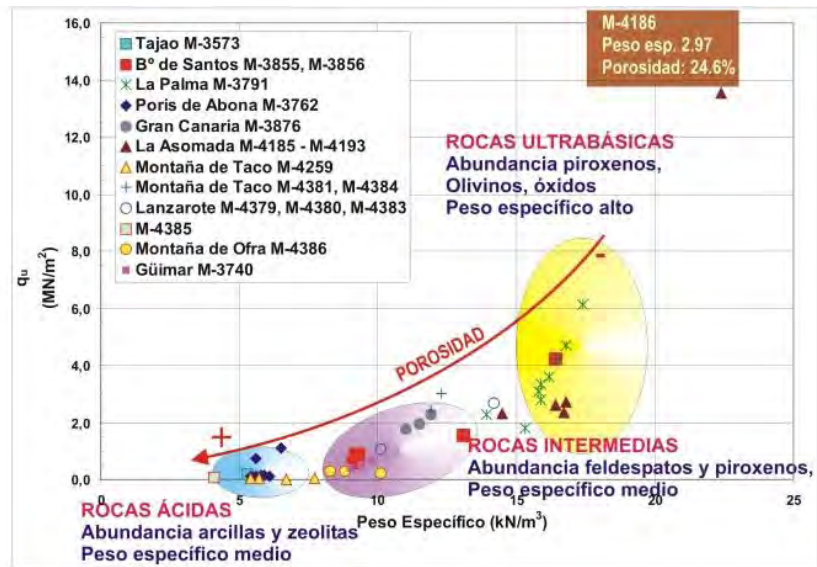


Fig. 3.29: Relación Resistencia a compresión simple (q_u)-Peso específico seco para los piroclastos canarios. (Santana et al, 2008).

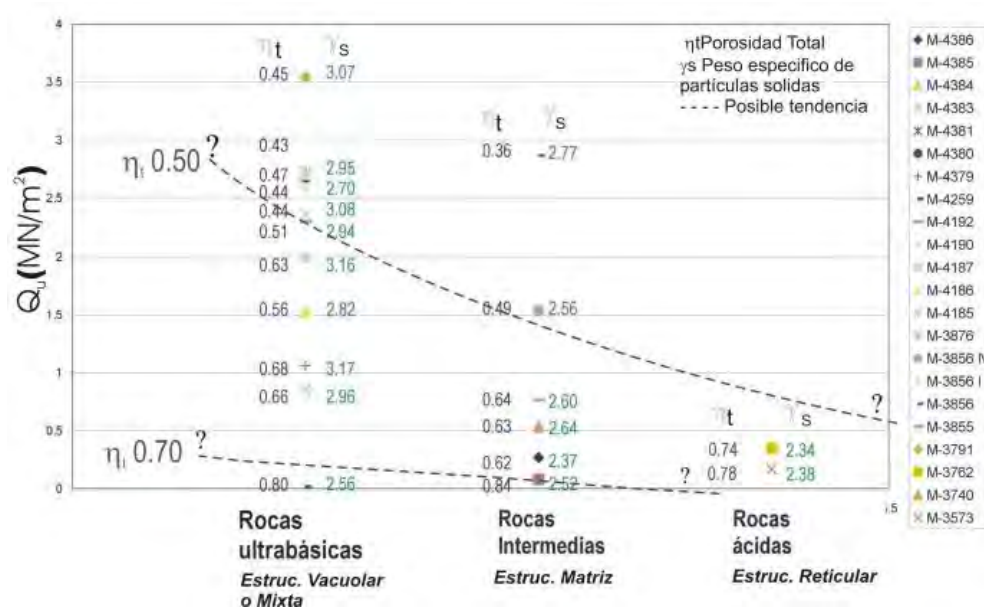


Fig. 3.30: Relación entre resistencia a compresión simple (q_u), porosidad y tipo de roca. (Santana et al, 2008)

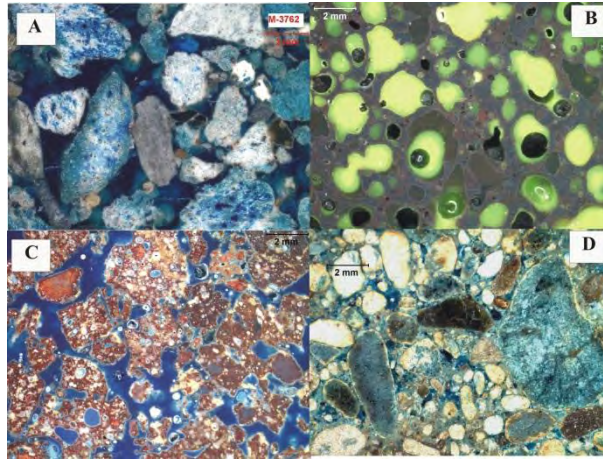


Foto 3.2: Micrografías de varios piroclastos con diferente estructura porosa, definida por los autores por los cuatro tipos siguientes: A- Reticular, B-Vacuolar, C-Mixta y D-Matricial. (Santana et al, 2008).

3.2.2 GRUPO ITALIANO

3.2.2.1 Año 1970

a. Introducción

Pellegrino (1970) llevo a cabo ensayos tanto de compresión isotropa como triaxiales en Calcarenitas y Tobas volcánicas (toba cinerítica con inclusiones de pómez, formadas por un proceso de litificación de puzolanas).

Mediante estos ensayos, Pellegrino observó que estos materiales porosos presentaban dos comportamientos diferentes en función de la presión. Por un lado, un comportamiento como roca, con un elevado módulo de deformación; y por otro como suelo, con bajos modelos de deformación.

Los resultados obtenidos por el autor son similares a los obtenidos por el grupo español en la misma época (Uriel y Bravo, 1970 y 1971) en materiales con una estructura similar pero diferentes orígenes.

b. Material de estudio

Los materiales volcánicos estudiados pertenecen a las Tobas Amarillas Napolitanas (*“Neapolitan Yellow Tuff”*). Foto 3.3.



Foto 3.3: Izqda.: Ensayo de tracción en „Neapolitan yellow tuff“, Dcha.: Foto de detalle de las „Neapolitan yellow tuff“.

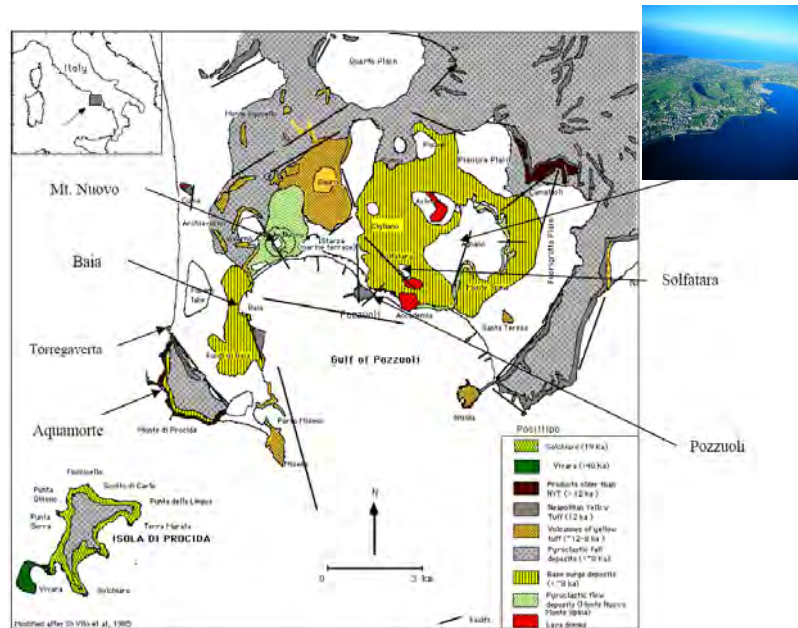


Fig. 3.31: Mapa geológico del *Campi Flegrei*.

Las tobas amarillas napolitanas (Fig. 3.31) son el segundo mayor depósito piroclástico de la Zona Volcánica de la Campania, que cubre al menos una superficie de 1.000 km² y un volumen estimado en 40 km³. Mientras que el depósito es generalmente de color gris y poco endurecido en las zonas distales, es amarillo y zeolitizado en la parte proximal de Nápoles - área de *Phlegrean*.

Las características de las tobas amarillas se resumen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Características de las tobas amarillas napolitanas (Pellegrino, 1970).

ESTRUCTURA	Valores medios		
	γ_d (gr/cm ³)	n	ζ_f (kg/cm ²)
Matriz de grano fino cinerítica englobando pumitas de hasta 1 cm de diámetro. Aparición de huecos con tamaño de algunos mm.	1	0,59	35
	1,1	0,55	58
Matriz compacta de grano fino cinerítica englobando pequeños clastos de pumita de hasta algunos mm de diámetro. Aparición de huecos con tamaños más pequeños de 1 mm.	1,4	0,43	130

c. Ensayos y Resultados

Pellegrino, mediante los resultados obtenidos en diferentes ensayos de compresión, observó que este tipo de roca presenta dos comportamientos diferentes en función de la presión:

1. Comportamiento como roca. En compresión isotropa corresponde a línea OM (Fig. 3.32) caracterizada por pequeñas deformaciones volumétricas (estas resultan de la deformación de los granos y los contactos) y un módulo casi constante. En los ensayos triaxiales éste comportamiento corresponde a la curva a en la Fig. 3.33, donde grandes incrementos del desviador causan pequeños incrementos en la deformación.
- Comportamiento como suelo. En compresión isotropa corresponde a la línea MNQ (Fig. 3.32), aquí se produce la rotura progresiva de los contactos, seguidos por el deslizamiento entre partículas y, por lo general, con un aumento rápido y grande la deformación volumétrica. En el caso de los triaxiales se produce un aumento en la deformación con el aumento del desviador. El gradiente $d(\sigma_1 - \sigma_3)/d\varepsilon_1$ disminuye con el incremento del desviador y se aproxima a cero en la rotura (curva d, de la Fig. 3.33).

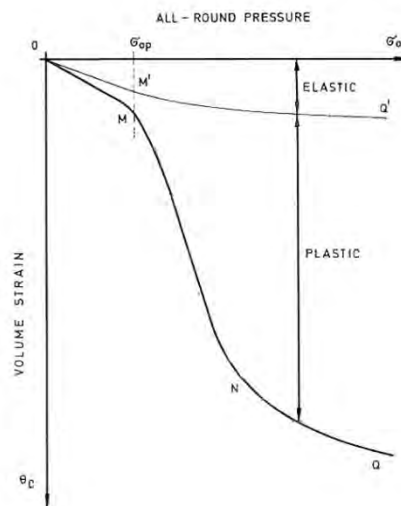


Fig. 3.32: Patrón esquemático de la relación entre la deformación volumétrica θ_0 y la presión de confinamiento σ_0 durante la compresión hidrostática. (Pellegrino, 1970).

La deformabilidad de la roca es un poco diferente en el rango de esfuerzos correspondiente a los dos comportamientos. En el rango de comportamiento como roca, el valor del módulo de Young $E = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)/d\varepsilon_1$ es del orden de miles a decenas de miles de kg/cm^2 ; este valor prácticamente no se ve afectado por la presión

de confinamiento y por el nivel de esfuerzos. En el rango de comportamiento como suelo, el valor de E decrece a algunos cientos a miles de kg/cm^2 , y claramente depende de σ_3 y del nivel de esfuerzo.

Las rocas blandas estudiadas muestran, a veces, un comportamiento distinto (roca, suelo o mixto) durante la aplicación del desviador (curva b y c en Fig. 3.33), dependiendo del estado previo de compresión hidrostática. Si $\zeta_3 \geq \zeta_{op}$, (Fig. 3.32) el comportamiento es siempre como suelo; si $\zeta_3 \leq \zeta_{op}$ puede presentar tanto un comportamiento tipo roca o uno mixto.

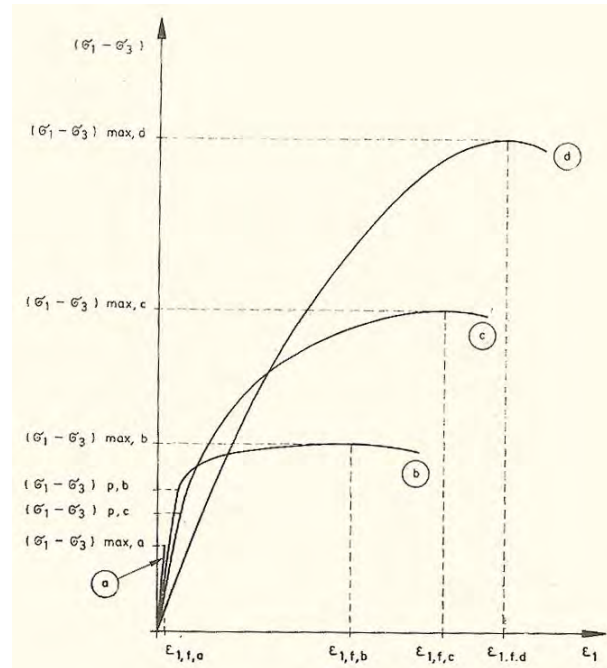


Fig. 3.33: Patrón esquemático de la relación $\epsilon_1=f(\sigma_1-\sigma_3)$; σ_3 aumenta desde *a* a *b*. (Pellegrino, 1970).

En las Fig. 3.34 y Fig. 3.35 se muestra claramente la separación de las zonas, en un diagrama de Mohr, que corresponden a la rotura frágil (comportamiento como roca) y rotura plástica (comportamiento como suelo). La transición entre ambos tipos de rotura muestra la existencia de una envolvente de los círculos de Mohr en rotura plástica de signo contrario y de análoga pendiente a la de la rotura frágil.

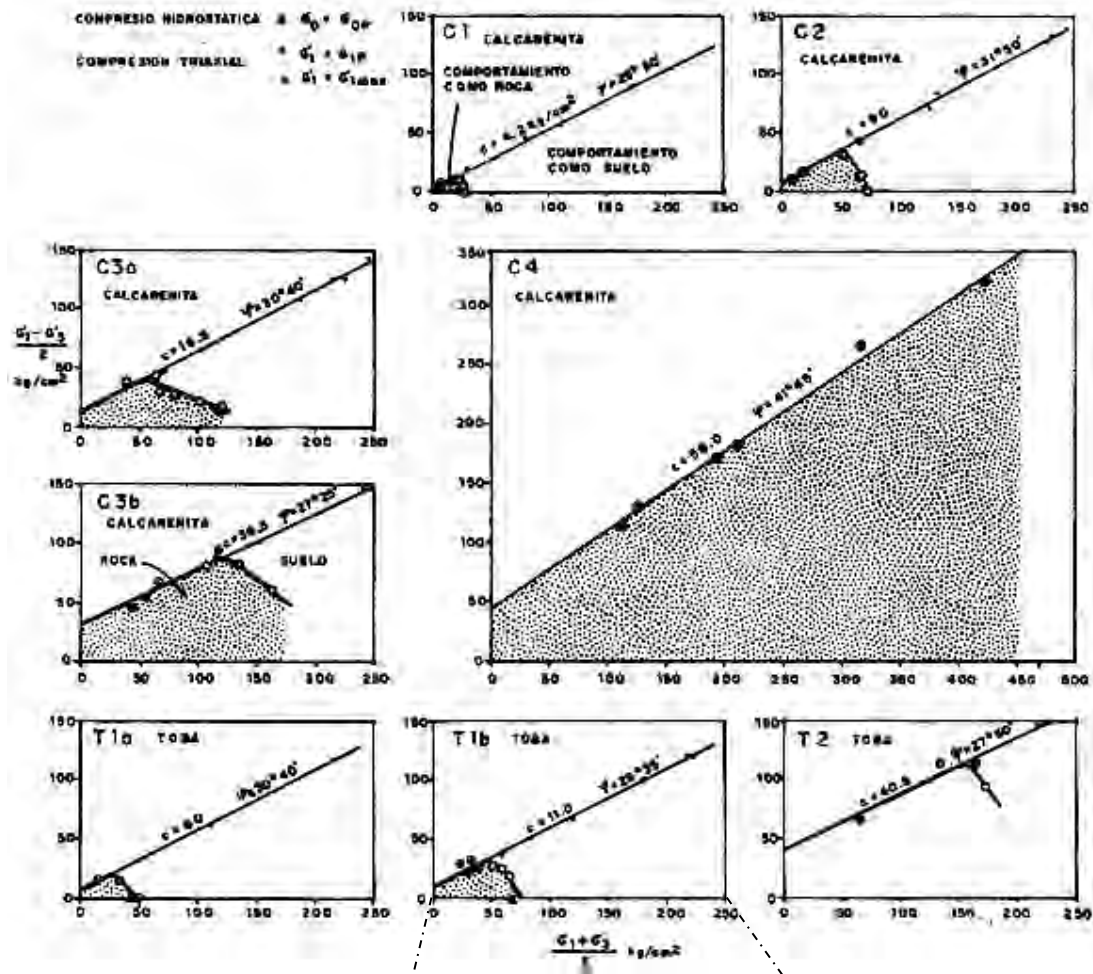


Fig. 3.34: Ensayos en calcarenitas y tobas, según A. Pellegrino. (Pellegrino, 1970).

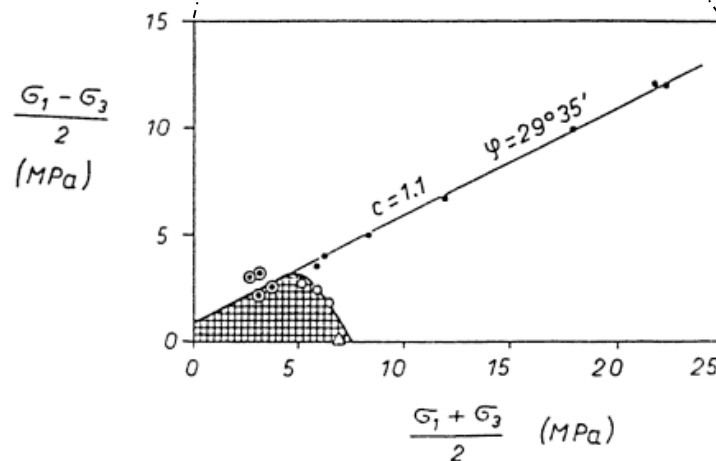


Fig. 3.35: Detalle de los resultados obtenidos en las tobas "Neapolitan Yellow", después de Pellegrino, 1970.

3.2.2.2 Año 1993

a. Introducción

Según Aversa y Evangelista (1993), el comportamiento de los suelos estructurados no puede ser interpretado teniendo en cuenta sólo el índice de huecos y su historial de tensiones. La presencia de enlaces débiles entre las partículas es un factor importante en la determinación de su rigidez y su resistencia. El enlace también caracteriza las propiedades de las rocas blandas.

El termino estructurado hace referencia a aquellos suelos y rocas blandas en las cuales las partículas o agregados están enlazadas.

b. Material de estudio

Los materiales que estudian estos autores son:

- Arcillas de Quebec, sedimentos marinos post-glaciales. Son homogéneos, con un índice de plasticidad entre 15% y el 40%, y un contenido en agua muy superior al límite líquido.
- Arcillas de los Apeninos Italianos, suelo de grano fino que presentan una estructura peculiar generada por esfuerzos tectónicos. Están constituidos por fragmentos duros (1-30 mm), con superficies pulidas. Estos materiales geológicos pueden distinguirse de otros suelos duros o rocas blandas por el hecho de que ellos no están estructurados en su conjunto, y que su comportamiento mecánico depende también de la presencia de discontinuidades muy próximas entre sí.
- Tobas piroclásticas (Nápoles) denominada: toba de Grano Fino. Es una roca piroclástica muy homogénea, que resulta de la deposición y diagénesis de productos piroclásticos calientes. La principal peculiaridad de estos materiales, si se comparan con otras tobas presentes en el área Napolitana, es que las dimensiones de los poros son extremadamente pequeñas y con tamaño uniforme (Aversa et al., 1991). La porosidad está entre 0.45 y 0.50, y el tamaño medio de los poros está en torno a los 10^{-3} mm. Se considera un material estructurado, uniforme y con propiedades isotropas.

La toba de Grano Fino es un material homogéneo que se encuentra en la ciudad de Nápoles (Fig. 3.31, la toba de grano fino es la que aparece en la leyenda como: *productos más antiguos que las tobas amarillas napolitanas [$>12ka$]*) y que debe su nombre al tamaño de grano fino de sus partículas constituyentes y a la falta de inclusiones pumíceas, las cuales son muy comunes en otros tipos de tobas Napolitanas.

c. Ensayos y Resultados

Aversa y Evangelista (1993), comparan los resultados de los ensayos edométricos de muestras intactas y muestras reconstruidas después de su completa disgregación, para ver la influencia que tiene la estructura de estos materiales en su resistencia y deformabilidad.

En las Fig. 3.36 a) y Fig. 3.37, puede observarse que la curva de compresión de las muestras inalteradas de suelo puede penetrar en un espacio imposible de esfuerzo (cuando se refieren a ensayos en muestras reconstruidas); esto se puede explicar por la presencia de enlaces entre las partículas. En este caso, se observa una superficie de estado límite más amplia que la teórica y que está relacionada sólo con la porosidad. Para el caso de la figura c), la baja porosidad del material determina un comportamiento similar al de los suelos no estructurados.

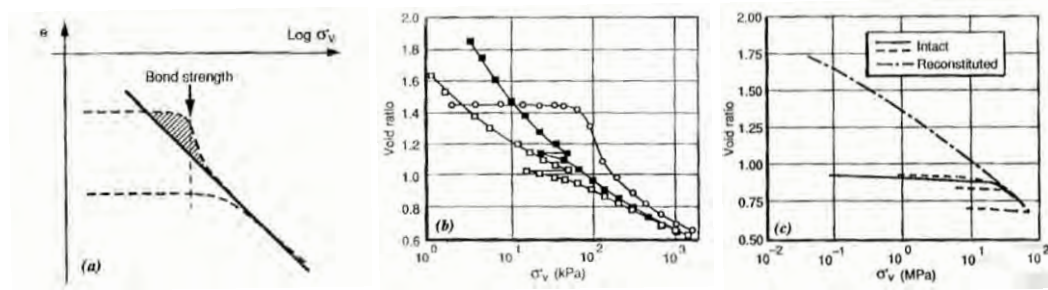


Fig. 3.36: Influencia de la unión en la curva de compresión de suelos estructurados y rocas blandas: a) Esquema simple; b) Arcilla Quebec (después de Locat y Lebre, 1984); c) Toba de Grano fino (después de Aversa et al., 1991). (Aversa y Evangelista, 1993).

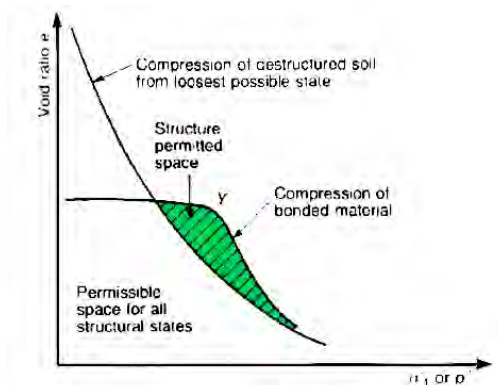


Fig. 3.37: Comparación de compresión desestructurada y estructurada en el ensayo edométrico (Leroueil, 1990).

En cuanto a los ensayos triaxiales, los autores obtienen los siguientes resultados y conclusiones (Fig. 3.38):

1. A bajas presiones la razón máxima de dilatancia ocurre sólo después del pico.

2. En rangos de presiones intermedias, un comportamiento de reblandecimiento deformacional está asociado con la contracción.
3. Incluso a altas deformaciones axiales (hasta 15-20%) no se alcanza un estado crítico, las deformaciones volumétricas no se estabilizan.

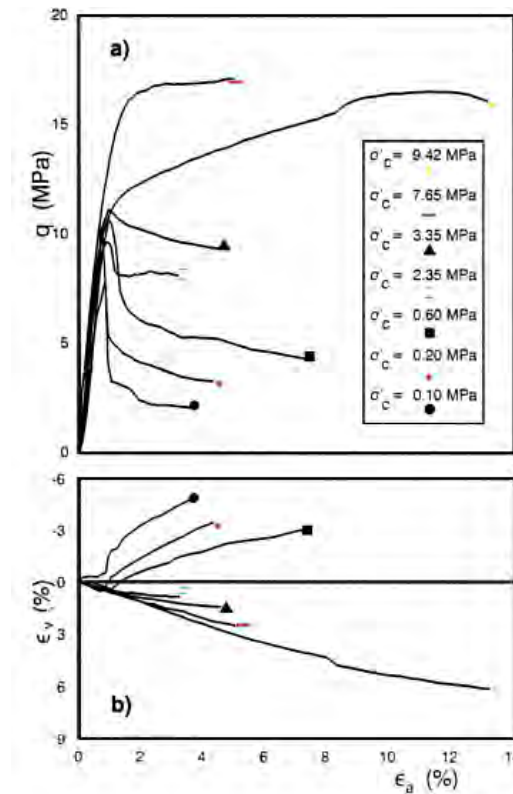


Fig. 3.38: Ejemplo de los ensayos triaxiales drenados en las tobas de Grano Fino (modificado después de Aversa et al., 1991).

Para estos materiales, en rangos de bajas presiones y después del pico, se forma una superficie de rotura definida; por lo tanto, el concepto de estado crítico, el cual se refiere a una condición de deformaciones uniformes, no se aplica estrictamente.

Los autores concluyen lo siguiente:

- El comportamiento de reblandecimiento deformacional es debido, ya sea por dilatancia o por colapso, a los enlaces entre las partículas; en particular, la resistencia de pico es principalmente debida a la unión de las partículas.
- El cambio de volumen asociado con la porosidad (contracción, dilatancia), se desarrolla para deformaciones mayores que las que se corresponden con la resistencia de pico.
- La des-estructuración parece ser un proceso largo y continuo que se lleva a

cabo sólo después de grandes deformaciones, a menudo mayores que los que se obtienen en la prueba triaxial.

En la Fig. 3.39 se observa que la envolvente de altas deformaciones es ligeramente curva, al menos dentro de la curva de fluencia; esto puede ser debido a:

- El punto final deducido del ensayo CIU, esta aun sometido a grandes deformaciones de dilatación o contracción y no puede considerarse que haya alcanzado el estado crítico,
- La envolvente de grandes deformaciones refleja un fenómeno de des-estructuración todavía en proceso, la intensidad del cual probablemente depende también del estado de las presiones.

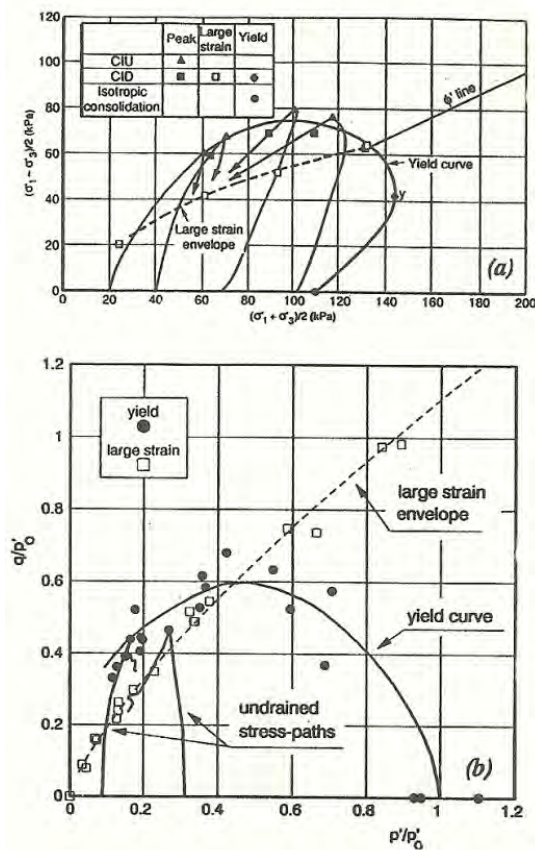


Fig. 3.39: Curva de fluencia y trayectorias de presiones efectivas en ensayos CIU realizados en muestras saturadas: a) St. Vallier caly (después de Lefebvrer, 1970; b) Toba de grano fino (modificado después de Aversa et al., 1991).

El papel de la dilatación y de los contactos:

Clough et al. (1981), después de unos ensayos en arenas naturales y artificialmente cementadas, concluyen que los enlaces entre partículas inducen un incremento de resistencia debido a un incremento sólo de cohesión. Maccarini (1987) llega a la

misma conclusión, pero en este caso con ensayos en suelos artificialmente cementados. Por otra parte, Lade y Overton (1989) observaron que, en arenas densas cementadas artificialmente, el contacto entre las partículas produce un aumento tanto de la cohesión como del ángulo de fricción. Según Lambe (1960), el incremento en el ángulo de fricción es debido a un aumento de la dilatancia relacionada con el tamaño efectivo de las partículas del suelo, que, en arenas cementadas, están compuestas de pequeñas partículas cementadas juntas.

Los autores usaron la teoría de la dilatancia-presión de Rowe (1962) para distinguir la parte de la resistencia debida a fricción y a dilatancia. La fórmula se aplica para ensayos CIU en altas deformaciones después de que se produce la destrucción de los contactos. De estos resultados, concluyeron que la unión entre las partículas tiene una gran importancia en la resistencia de pico. Esta observación está de acuerdo con la consideración de que en materiales estructurados los mayores valores de dilatancia se desarrollan después del pico.

3.2.2.3 Año 1994

a. Introducción

El estudio llevado a cabo por Evangelista y Aversa (1994) está dividido en dos partes, una que se ocupa del comportamiento no lineal y otra que se ocupa del comportamiento de fluencia de las tobas.

Como se verá más adelante, estos materiales presentan un comportamiento tensional muy similar al expuesto por Serrano, en el año 1976, para los aglomerados volcánicos.

b. Material de estudio

En cuanto a los materiales ensayados (Foto 3.4), por un lado están las tobas de San Rocco (T1) que pertenecen a la formación de las Tobas Napolitanas Amarillas (NYT) (mismo material estudiado en los años 70 por Pellegrino); y por otro, las Tobas de Grano Fino (TF), estudiadas por Aversa en el año 93.

En la Tabla 3.11 se recogen las características más relevantes de los materiales ensayados por Evangelista y Aversa (1994).

Tabla 3.11: Características de los materiales ensayados por Evangelista y Aversa (1994). T1: Tobas de San Rocco, TF: Tobas de grano fino.

Símbolo	Toba	PesoEspecífico de las partículas $\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	Porosidad n (%)	Peso Específico seco $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	Resistencia Compresión Simple. $\sigma_c(\text{MPa})$	Coefficiente Permeabilidad k(cm/s)
T1	San Rocco	24,4	55,5	10,85	3,88	1,5E-6
						6,4E-6
TF	Grano Fino	24,30	47,30	12,80	15,29	1,6E-7

La principal diferencia entre ambas tobas está en la forma y tamaño de los poros. Las tobas TF presentan poros uniformes y pequeños mientras que la T1 tiene poros irregulares y grandes.

En la T1 predominan las inclusiones de pumita, y estas tienen una disposición un poco caótica. En la TF presentan pocas inclusiones de pumita y muy pequeñas inclusiones de líticos.

La toba T1, como otras tobas de las pertenecientes a las “Neapolitan Yellow Tuff”, está caracterizada por una alta variabilidad estructural que se corresponde con una

alta variabilidad en el comportamiento mecánico.



Foto 3.4: Izqda.: Vista del “Phlegrean Fields”. Italia. Dcha.: Erupción más reciente en “Campi Flegrei”. Italia.

c. Ensayos y Resultados

Los ensayos llevados a cabo por los autores fueron:

1. Compresión isótropa:

Pellegrino (1970) fue el primero en observar el comportamiento no lineal de las tobas amarillas napolitanas, cuya compresibilidad a compresión isótropa está altamente influenciada por el valor de los esfuerzos principales (Fig. 3.40 y Fig. 3.41).

Como ya se dijo anteriormente (Aversa y Evangelista, 1993), estos materiales presentan un comportamiento como roca, a bajas presiones; y como suelo, a altas presiones (Fig. 3.40).

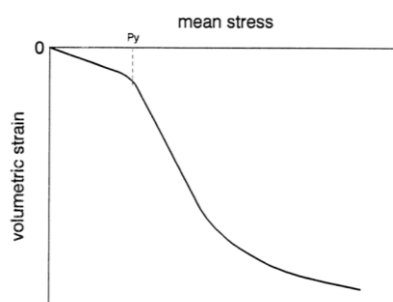


Fig. 3.40: Patrón esquemático de la relación entre la deformación volumétrica y el esfuerzo isótropo para las Tobas NY. (Evangelista y Aversa, 1994).

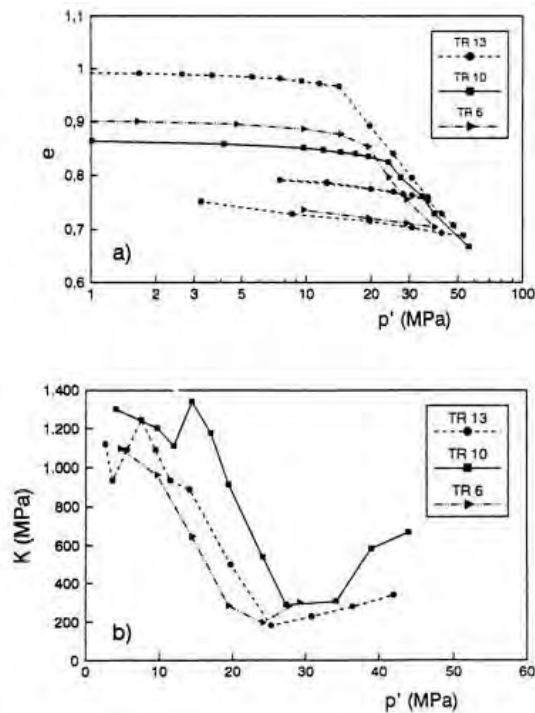


Fig. 3.41: Ensayo de compresión isotrópica en las tobas TF: a) Índice de huecos versus esfuerzo; b) Módulo de compresibilidad vs. Esfuerzos. (Aversa y Evangelista, 1993).

El valor de la presión de fluencia en compresión isotrópica esta generalmente relacionado con la resistencia a compresión simple de la toba. Para San Rocco y Grano fino este valor esta entre 1.5 y 2 veces la resistencia a compresión simple, ζ_c . Una proporción diferente, aproximadamente igual a 1, ha sido obtenida para otra toba amarilla, la toba Quarto, estudiada por los mismos autores.

2. Compresión triaxial:

El comportamiento mecánico de las tobas a lo largo de las trayectorias de esfuerzos próximas a la rotura está influenciado por el valor de los esfuerzos efectivos medios.

Para valores bajos de presiones de confinamientos efectivos (Fig. 3.38), el comportamiento es aproximadamente lineal hasta la rotura, la cual ocurre a bajos valores de deformaciones axiales (aprox. 0.5%). Después del pico, se produce una reducción significativa y brusca de la resistencia del material (comportamiento frágil). Dicha fragilidad decrece con el aumento de la presión de confinamiento. Después del pico, la curva esfuerzo-deformación se aproxima a un valor constante de resistencia.

A altos valores de presiones de confinamiento pero inferiores a la presión de colapso, el comportamiento es significativamente diferente. El material está caracterizado por un comportamiento elástico-lineal sólo en la primera parte de la curva, seguido por un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento deformacional. La rotura se

alcanza después de grandes deformaciones axiales (hasta 20%). Las presiones de confinamiento son menores que la presión de colapso.

De las gráficas de las deformaciones volumétricas versus deformación axial, se concluye que las tobas dilatan sólo a valores bajos de presiones de confinamiento (por debajo de 1MPa). Como ya se ha comentado, el valor máximo de dilatancia ocurre solo después del pico, esto es común en las rocas blandas y muchos suelos estructurados. A altas presiones de confinamiento, sin embargo, el comportamiento es siempre de contracción.

Como se puede observar en la Fig. 3.41, a altas deformaciones axiales (hasta 15-20%) la resistencia toma un valor prácticamente constante pero la deformación volumétrica no está estabilizada aun. Por esta razón, Aversa, Evangelista y Ramondini (1990) definen este estado como último, no como crítico.

Rotura y fluencia:

Aversa, Evangelista y Ramondini (1990) distinguen la resistencia de pico de la resistencia última de las tobas TF y usan una envolvente de rotura compuesta de dos partes: la primera interpola las resistencias de pico, mientras que la segunda interpola la resistencia última.

De acuerdo con Adachi (1981) (éste criterio se explicará más adelante en el grupo de Japón), la resistencia de pico y última están representadas por:

$$\frac{q}{p_1} = \alpha \left(\frac{p'}{p_1} \right)^\beta \quad \text{Eq.1}$$

De acuerdo con el criterio de Mohr-Coulomb se usan dos funciones lineales, una de pico y otra de condiciones últimas (Fig. 3.42).

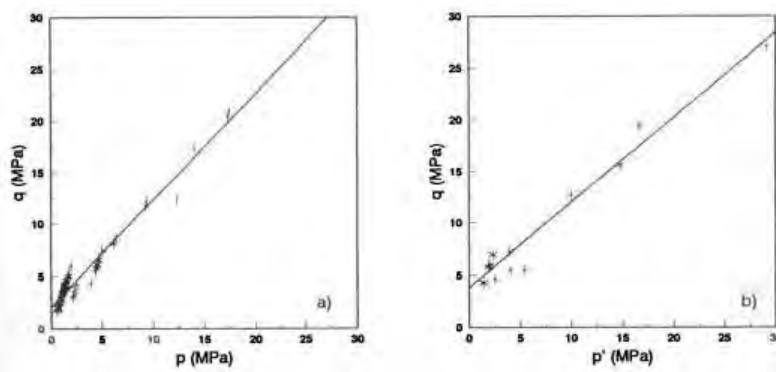


Fig. 3.42: Criterio de Mohr-Coulomb aplicado a las tobas NY: a) Toba T1; b) Toba “Quarto”. (Evangelista y Aversa, 1994).

El criterio de Adachi (1981) sigue los datos experimentales más de cerca, mostrando

un mejor ajuste especialmente a bajos valores de la media de las presiones.

Ambos criterios, el bilineal de Adachi (1981) y Mohr-Coulomb presentan algún problema. El primer criterio no considera la posibilidad de definir una resistencia a la tracción uniaxial, pasando la envolvente de la resistencia de pico a través del origen del eje. El criterio bilineal predice una cohesión ilógica para la resistencia última.

El criterio de Adachi (1981) puede ser modificado para tener en cuenta la posibilidad de que el material sufra tensión de tracción. El nuevo criterio de rotura está expresado por la siguiente ecuación:

$$\frac{q}{p_1} = \alpha \left(\frac{p' + p'_t}{p_1} \right)^\beta \quad \text{Ec.2}$$

En el cual p'_t es una presión que toma el valor cero para resistencias últimas y un valor distinto de cero para la resistencia de pico (Fig. 3.43).

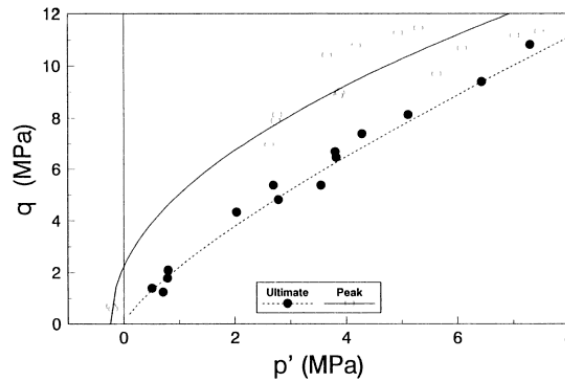


Fig. 3.43: Envolvente de rotura toba TF: Criterio descrito por la ecuación 2. (Evangelista y Aversa, 1994).

Las figuras Fig. 3.44 y Fig. 3.45 muestran las superficies de fluencia para las tobas TF. La dispersión de los puntos de fluencia puede ser debida, en parte, a los diferentes valores de porosidad y en parte al grado de unión, y a otras características estructurales. La compresión isótropa aumenta significativamente con la disminución de la porosidad, algo parecido ocurre con la resistencia a compresión, esta aumenta con la disminución de la porosidad.

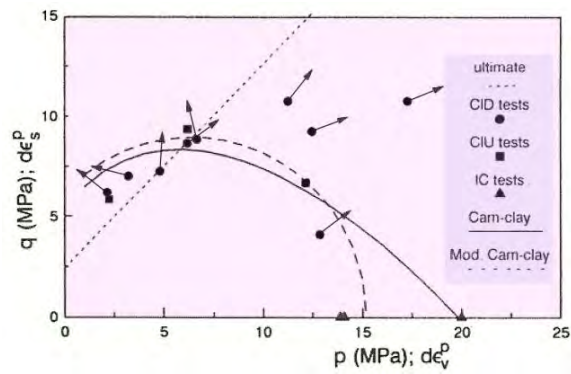


Fig. 3.44: Superficie de fluencia para las tobas TF. (Evangelista y Aversa, 1994).

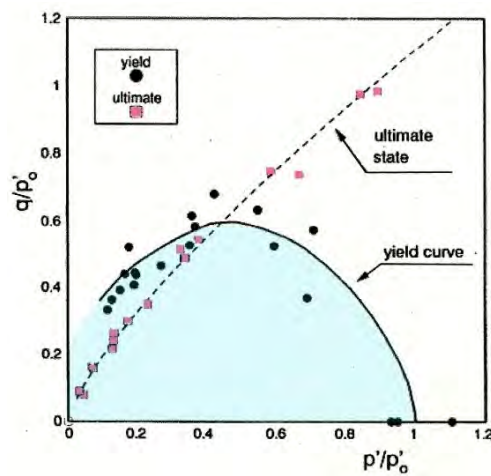


Fig. 3.45: Superficie de fluencia para las tobas TF en un plano normalizado. (Evangelista y Aversa, 1994).

3. Ensayos de placa de carga:

En este ensayo se puede ver el comportamiento no lineal de las tobas.

Las tobas ensayadas son similares a las tobas T1.

Los resultados se recogen en la Fig. 3.46.

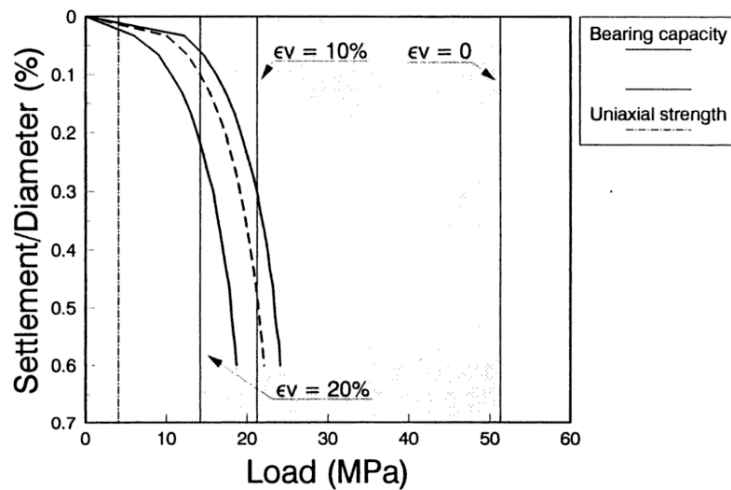


Fig. 3.46: Ensayo de placa de carga en las Tobas NY: curva de carga-asiento comparado con la capacidad de carga y resistencia uniaxial usando la teoría de Vesic. (Evangelista y Aversa, 1994).

La curva de carga-deformación presenta una tendencia lineal inicial hasta una tensión de, aproximadamente, el doble de la resistencia a la compresión uniaxial, seguida por un comportamiento de endurecimiento no lineal. Después de esta tendencia lineal, la placa comienza a perforar la toba. Solo se observan grietas radiales en la superficie de la toba.

Los autores no llegaron a ninguna conclusión con este ensayo.

3.2.2.4 Años 1998

En este año, se publican varios trabajos sobre diferentes coladas piroclásticas italianas. A continuación se resumen los aspectos más importantes de dichos trabajos para cada tipo de colada:

1. *Toba de Grano Fino:*

a. Introducción

En este estudio, Aversa y Evangelista (1998) presentan, por un lado los resultados de los ensayos llevados a cabo sobre las tobas denominadas de Grano Fino (TGF); y por otro, los autores proponen un criterio de resistencia y definen la forma de la curva de fluencia para dichos materiales.

b. Material de estudio

Los materiales ensayados son los mismos que los estudiados por Aversa en el año 1993, es decir, la toba de Grano Fino (TGF), la cual es una roca piroclástica muy homogénea.

Las propiedades principales físicas y mecánicas están recogidas en la Tabla 3.12; se trata de valores medios.

Tabla 3.12: Propiedades de las tobas de grano fino (Aversa y Evangelista, 1998).

Densidad seca	12.8 kN/m ³
Porosidad	47.3%
Resistencia a la compresión	8 MPa
Permeabilidad	1.6x10 ⁻⁹

c. Ensayos y Resultados

Los ensayos se llevaron a cabo, principalmente, para definir los patrones de comportamiento de estos materiales, de manera que los resultados pudieran ser extendidos a las tobas Amarillas Napolitanas, NYT, y en general, a otras rocas piroclásticas.

Las muestras fueron sometidas a ensayos edométricos, de compresión isotropa y triaxiales drenados y no drenados, estos últimos en un amplio rango de presiones de confinamiento (hasta 60 MPa).

Los resultados muestran claramente la influencia de la “estructura”, tal como la definieron Leroueil y Vaughan (1990), sobre el comportamiento mecánico de dichos materiales.

Se usan los parámetros de Cambridge:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \text{ y } q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Se llevaron a cabo ensayos triaxiales especiales, con el objetivo de investigar el efecto de la llamada “des-estructuración” sobre el comportamiento mecánico de los materiales. En estos ensayos las muestras fueron sometidas primero a una compresión isotropa, la cual fue aproximadamente dos veces la tensión de fluencia isotropa y después se continuaba con la descarga a un valor más bajo, y a continuación se llevaba a cabo el ensayo de compresión triaxial estándar.

1. Ensayos de compresión isotropa:

En la Fig. 3.47 se observa que a altas presiones se produce una disminución en la rigidez, relacionado con la fase de desestructuración. Después, la rigidez aumenta como en los suelos no estructurados. Los ciclos de carga y descarga demuestran la naturaleza no reversible de las deformaciones y el comportamiento rígido de los materiales durante estos ciclos.

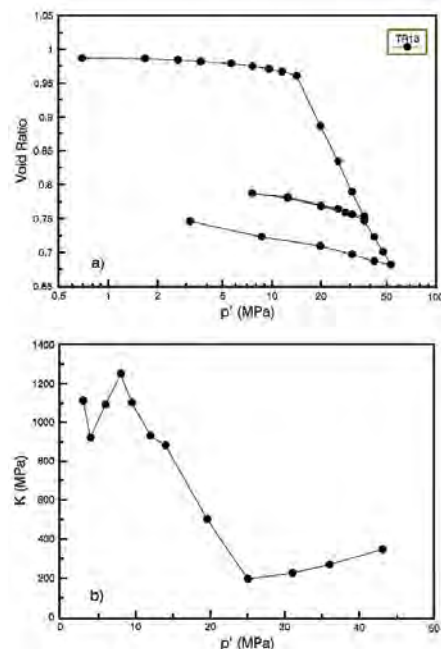


Fig. 3.47: Ensayo de compresión isotropa en muestras TGF, n° T13: a) índice de huecos vs. Esfuerzo principal medio; b) Módulo de compresibilidad ($k = \Delta p / \Delta v$) vs. Esfuerzo efectivo medio. Aversa y Evangelista (1998).

La Fig. 3.48 muestra la dependencia de la tensión de fluencia y el índice de poros: cuanto más alto sea el índice de poros más baja es la tensión de fluencia. Después de la fluencia, las curvas e - $\log(p')$ son paralelas. Se obtiene una línea de compresión normal (NCL) similar a la de los suelos (Fig. 3.48). La pendiente de esta línea es 0.389.

En estos materiales, la presencia de una estructura no produce la forma típica con un punto de inflexión, como se ha demostrado en numerosos materiales estructurados (Leroueil and Vaughan, 1990).

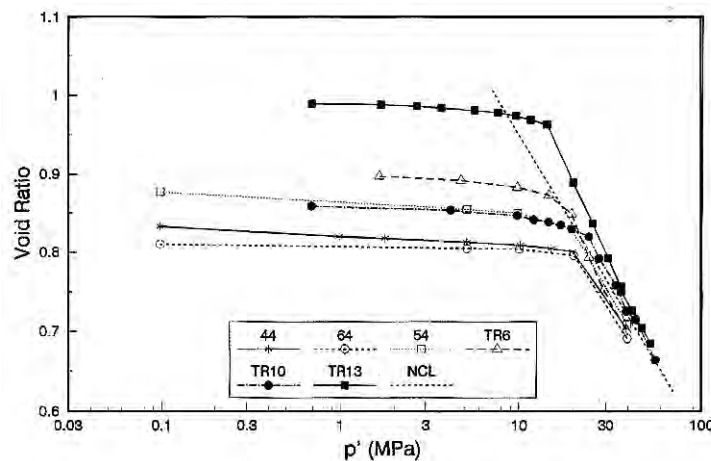


Fig. 3.48: Ensayo de compresión isotrópica: índice de huecos vs. Esfuerzos efectivos medios. Aversa y Evangelista (1998).

2. Ensayo triaxial drenado:

El comportamiento mecánico de la toba “Grano Fino” a lo largo de las trayectorias de esfuerzos está influenciada por el valor de la media de los esfuerzos efectivos principales.

En la Fig. 3.49 y Fig. 3.50 se pueden ver las curvas de algunos ensayos triaxiales, la primera es a bajas presiones de confinamiento y la segunda a altas. En ellas se observa la diferencia de comportamiento que presentan estos materiales bajo distintas presiones de confinamiento, como se ha explicado anteriormente.

En general, en el caso de grandes deformaciones, cuando el esfuerzo desviador alcanza un valor constante, la deformación volumétrica no se ha estabilizado aun. Por esta razón, este estado puede ser definido como último y no como crítico.

La resistencia a tracción fue, en promedio, el 10% de la resistencia a compresión simple.

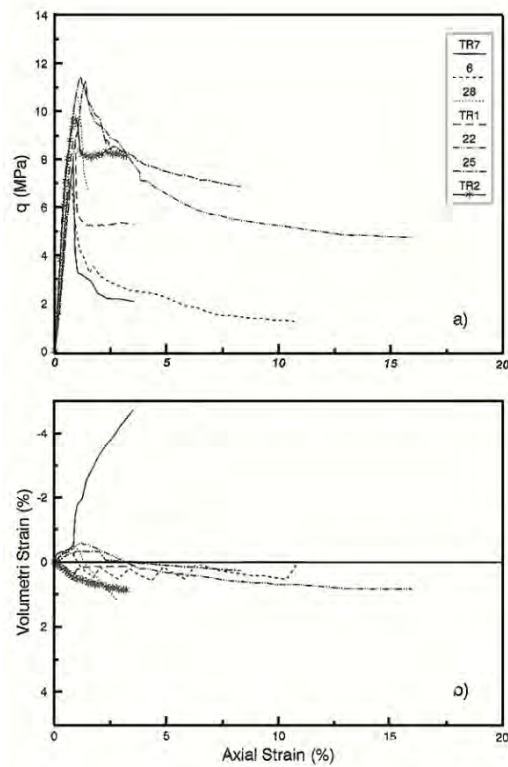


Fig. 3.49: Ensayos de compresión triaxial a bajas tensiones efectivas medias: a) tensión desviador vs. Deformación axial; b) deformación volumétrica vs. Deformación axial. Aversa y Evangelista (1998).

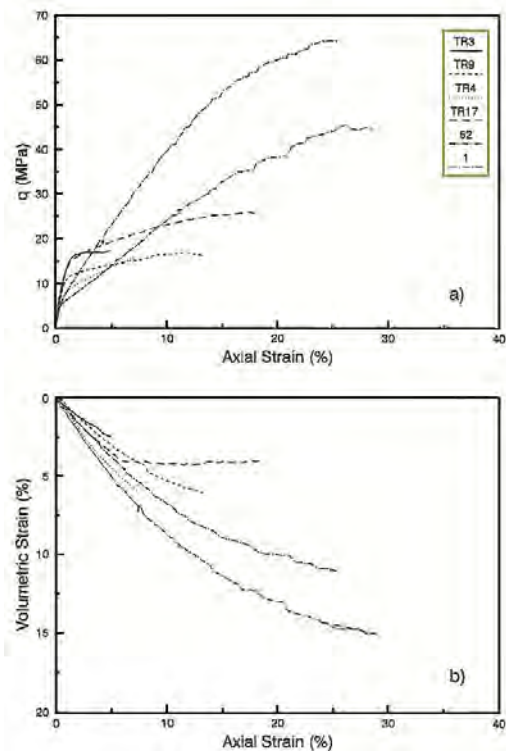


Fig. 3.50: Ensayos triaxiales drenados a altas tensiones: a) tensión desviadora vs. Deformación axial; b) deformación volumétrica vs. Deformación axial. Aversa y Evangelista (1998).

Criterio de resistencia:

En la Fig. 3.51 se muestran los valores de la resistencia de pico y última. La resistencia última se ajusta bien por medio de una relación lineal (Criterio de Mohr-Coulomb) pasando por el origen del eje. La pendiente M de esta línea es 1.28, que corresponde a un ángulo de resistencia de corte $\phi' = 35^\circ 22'$.

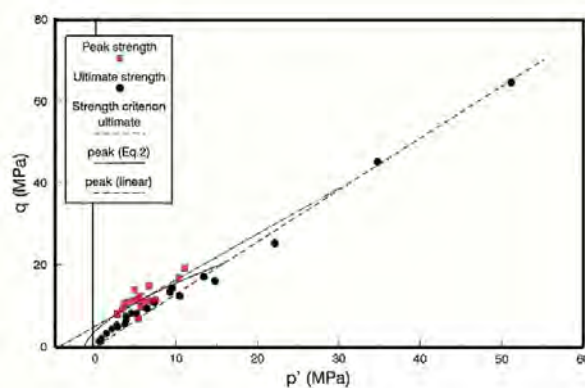


Fig. 3.51: Criterio de resistencia propuesto. Aversa y Evangelista (1998).

Observando la ampliación de la figura anterior a bajas presiones (Fig. 3.52), se ve que los puntos de resistencia última están localizados por encima de la envolvente de resistencia última. Dentro de este rango de esfuerzos (p' hasta 15MPa), una función potencial se ajusta mejor a los datos experimentales. De acuerdo con Aversa et al. (1993) esta característica es debida a la dilatancia en correspondencia con la condición de estado último.

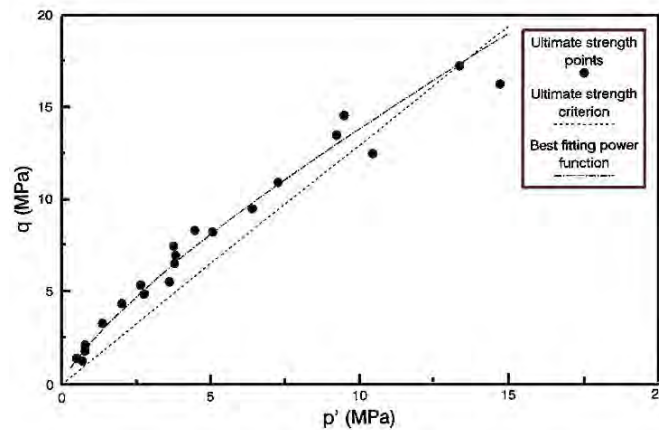


Fig. 3.52: Ampliación de la Fig. 3.51 a bajas tensiones, con la función de mejor ajuste. Aversa y Evangelista (1998)

El punto de resistencia de pico ha sido interpolado por una función potencial similar a la de Adachi et al. (1981), modificada para tener en cuenta la posible resistencia a tracción del material.

$$\frac{q}{p_1} = \alpha \left(\frac{p' + p'_t}{p_1} \right)^\beta$$

En esta expresión p_1 es una presión de referencia arbitraria y α y β son coeficientes adimensionales cuyos valores dependen de la presión p_1 elegida.

Los autores obtuvieron los datos a través de un procedimiento de prueba y error. El criterio de Mohr-Coulomb también se utilizó para el ajuste de los puntos de resistencia de pico (Fig. 3.51). La cohesión resultante es igual a 2.4 MPa y el ángulo de resistencia al corte es 28°22'.

La insatisfactoria interpolación de los puntos de resistencia de pico puede ser particularmente atribuido a la gran dispersión de valores de la porosidad inicial de las muestras.

Superficie de rotura:

La dispersión de los datos tanto en compresión isótropa como en triaxiales, puede ser atribuida en parte a los diferentes valores de porosidad inicial y en parte a diferentes

grados de soldadura (enlace) y a otras características estructurales.

Como se vio al principio, muestras con los valores más bajos de porosidad exhiben esfuerzos de fluencia mayores. De acuerdo con un proceso de normalización sugerido por la Mecánica de Suelos del Estado Crítico con referencia a los suelos, la influencia de la porosidad inicial puede ser eliminada dividiendo las tensiones de fluencia por una presión de referencia p'_0 (es la presión efectiva media correspondiente a la intersección de la línea de re-compresión relativa a la porosidad inicial de la muestra, con la línea de compresión isótropa).

Los puntos normalizados de fluencia se pueden interpolar por medio de una curva derivada del modelo Cam-Clay Modificado, desarrollado a finales de los años 60 para describir el comportamiento de las arcillas (Roscoe and Burland, 1968), revisada a fin de tener en cuenta la resistencia a tracción de las tobas.

$$\left(\frac{q}{p'_0}\right)^2 = R^2 \left[\left(\frac{p'}{p'_0} + \frac{p'_{tr}}{p'_0}\right) \left(1 + \frac{p'_{tr}}{p'_0}\right) - \left(\frac{p'}{p'_0} + \frac{p'_{tr}}{p'_0}\right)^2 \right]$$

En el cual $\frac{p'_{tr}}{p'_0}$ es el valor absoluto de la intersección negativa de la curva de fluencia con el eje $\frac{p'}{p'_0}$; R es la relación entre el eje vertical y el horizontal de la elipse. Este parámetro R no tiene por qué coincidir con la pendiente M de la línea de resistencia última.

3. Ensayos triaxiales especiales:

Los autores realizaron ensayos de compresión isótropas en 7 muestras de tobas hasta un máximo de esfuerzos efectivos medios de confinamiento de $p'=20\text{MPa}$. Después de la descarga, las muestras se sometieron a ensayos triaxiales drenados bajo diferentes trayectorias de esfuerzos dentro de un amplio rango de presiones efectivas de confinamiento (0.1-30MPa). Estos ensayos se llevaron a cabo para analizar el comportamiento de las muestras des-estructuradas.

La Fig. 3.53 muestra los resultados obtenidos de ensayos triaxiales sobre una muestra intacta y otra previamente des-estructurada. La presión de confinamiento en ambos caso fue de 0.1 MPa. La comparación entre ambas curvas muestra claramente que el proceso de des-estructuración provoca una reducción significativa de la resistencia de pico y la rigidez, pero no tiene una gran influencia en la resistencia última.

La curva esfuerzo-deformación de la muestra des-estructurada aun muestra un comportamiento frágil. La disminución en la resistencia después del pico es aun significativa, como normalmente ocurre cuando se desarrolla una superficie de rotura en un material estructurado. Esto puede probar que la des-estructuración inducida durante la compresión isótropa no es completa. Esto quiere decir que para que se

produzca una destrucción completa de la estructura en estas tobas se necesitan grandes deformaciones volumétricas (es decir, grandes esfuerzos isotropos).

La comparación entre las curvas de deformación axial-deformación volumétrica, muestran que la des-estructuración disminuye la dilatancia, la cual, probablemente, es debida a la reducción de la rugosidad de la superficie de rotura.

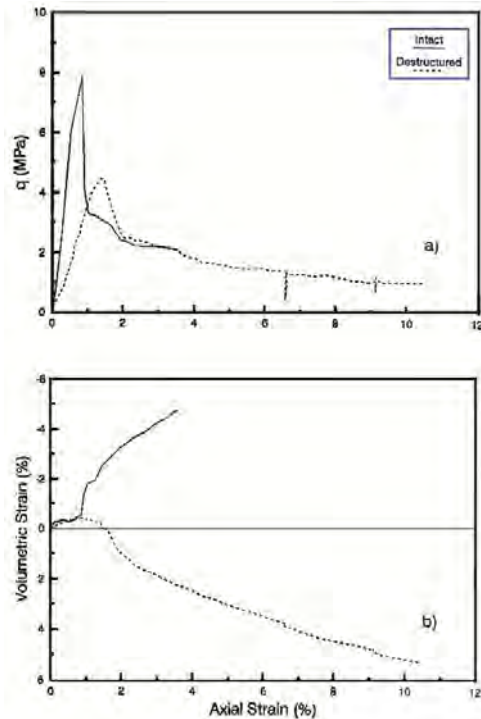


Fig. 3.53: Comparación entre las muestras intactas y las des-estructuradas en ensayos triaxiales drenados a bajas presiones: a) tensión desviadora vs. Deformación axial; b) deformación volumétrica vs. Deformación axial. Aversa y Evangelista (1998).

A altas presiones de confinamiento, la combinación de la des-estructuración y la reducción de la porosidad (es decir, del aumento de la presión de confinamiento isotropo) tiene diferentes efectos. Al comparar las curvas de esfuerzos-deformación entre una muestra previamente des-estructurada y otra intacta bajo ensayos triaxiales a altas presiones de confinamiento, se observa que el esfuerzo de fluencia es mayor en la roca des-estructurada que en la roca intacta. En este rango de esfuerzo el efecto de la reducción de la porosidad prevalece sobre la des-estructuración parcial de la muestra.

La comparación entre la curva de deformación axial-deformación volumétrica muestra que los cambios de volumen más bajos ocurren en los ensayos en muestras des-estructuradas, la cual ya ha experimentado deformaciones volumétricas durante la compresión isotropa.

Si se comparan las curvas de fluencia de las muestras des-estructuradas y las intactas (Fig. 3.54), se observa que los puntos de fluencia de las muestras des-estructuradas caen muy dentro de la curva de las muestras intactas. El efecto combinado (Fig. 3.55) de la des-estructuración y de la disminución de la porosidad se corresponde a un aumento del diámetro máximo de la elipse y una reducción de la relación entre el diámetro min. y el máx.

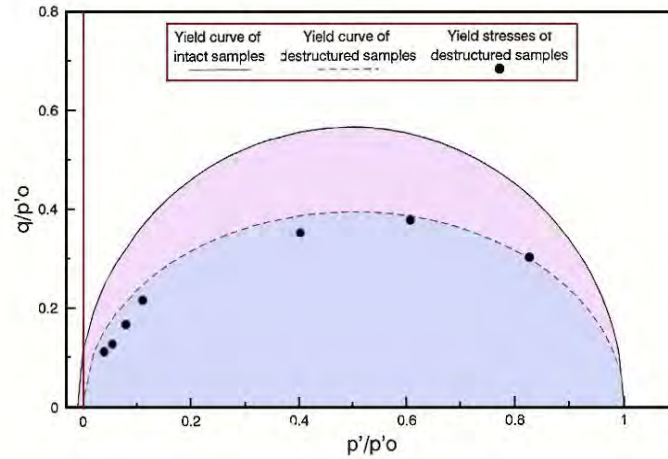


Fig. 3.54: Tensión de fluencia de las muestras des-estructuradas comparadas con la curva de fluencia de las muestras intactas en el plano normalizado. Aversa y Evangelista (1998).

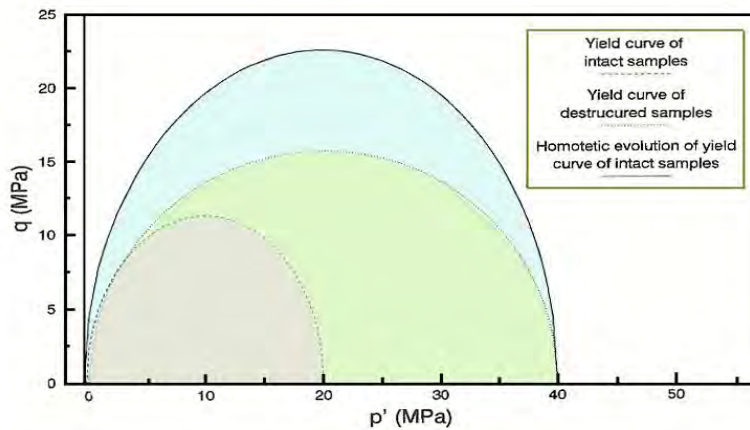


Fig. 3.55: Evolución de la curva de fluencia durante la compresión isotrópica. Aversa y Evangelista (1998).

2. *Pozzolana Nera:*

a. Introducción

Cecconi y Viggiani (1998 a 2002), realizan un análisis de la resistencia al corte de unas coladas piroclásticas pertenecientes a la formación Colli Albani. Además, estudian la influencia de la estructura de estas tobas en su resistencia.

b. Material de estudio

El material ensayado es una roca piroclástica débil, conocida como “*Pozzolana Nera*”. Se trata de un material de grano grueso y bien graduado; en general consiste en un 60% de grava, 30% de arena y menos del 10% de limo. Debido a su origen geológico (se trata de coladas piroclásticas) son materiales muy heterogéneos, tienen un espesor de casi 10m. El depósito está por encima del nivel freático y por tanto parcialmente saturados en su estado natural, con una media en contenido de agua de aproximadamente $13 \pm 1.7\%$.

Los componentes principales de los agregados son vidrios, pumitas, cristales de minerales y fragmentos líticos.

Los depósitos piroclásticos que pertenecen a la formación Colli Albani, consisten principalmente de diferentes capas de productos conocidos como Puzolanas; cada capa es el resultado de una sola colada piroclástica (Fig. 3.56).

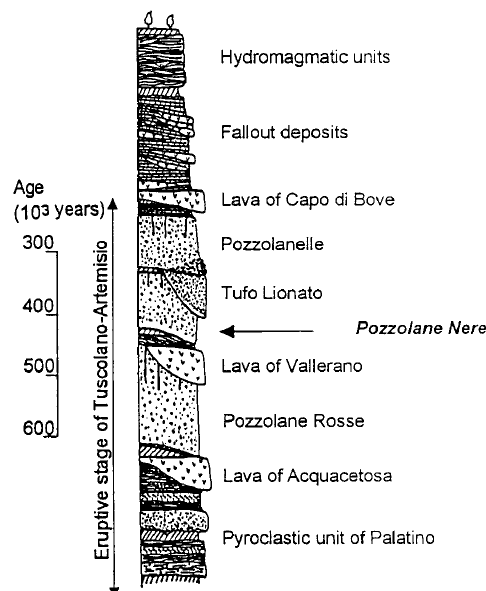


Fig. 3.56: Izqda.: Perfil del subsuelo de la formación Colli Albani.

Las propiedades físicas medias de estos materiales se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Propiedades físicas de las tobas “pozzolana nera”.

w_0 (%)	G_s	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	n (%)	S_r (%)
13±1.7	2.69	16.46±0.06	14.6±0.03	45±1	43.5±3.5

Para observar mejor la estructura de estos materiales las autoras utilizaron el microscopio electrónico de barrido. En la Foto 3.5 se presentan unas fotos de la *Pozzolana Nera* realizadas al microscopio.

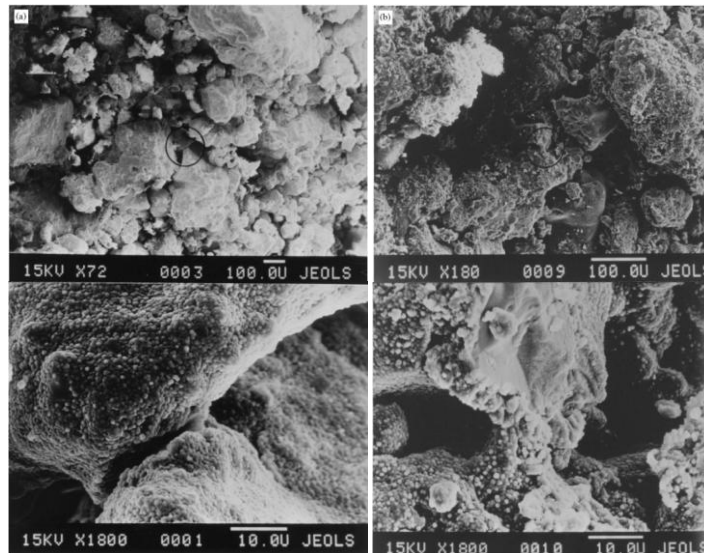


Foto 3.5: Fotos con el microscopio electrónico de barrido de Pozzolana Nera: (a) 72X y detalle a 1800X, (b) 180X y detalle a 1800X. Cecconi y Viggiani (1998).

c. Ensayos y Resultados

Debido a la dificultad que presentaba el conseguir buenas probetas de estos materiales, se congelaron los bloques (Cecconi, 1998). Los ensayos de compresión simple dieron valores entre 1.3 y 2 MPa, dependiendo del grado de saturación y las dimensiones de la muestra.

Los ensayos se realizaron en muestras naturales y muestras remoldeadas, con el fin de comparar los resultados. A continuación se va a exponer los diferentes ensayos llevados a cabo por las autoras y los resultados más importantes.

1. Ensayos edométricos:

Para la mayoría de las muestras inalteradas, el índice de huecos inicial se encuentra entre 0.785 y 0.820. Bajo carga de compresión uniaxial (ensayo edométrico), las muestras presentan una respuesta relativamente rígida seguida de una fluencia gradual. Los valores de la tensión de fluencia, mostrados con una flecha en la Fig. 3.57, se determinan usando el procedimiento de Casagrande (Casagrande 1936). En esta figura se observa como después de la fluencia, se producen grandes deformaciones volumétricas a lo largo de una línea de compresión noval muy definida. Las curvas de descarga obtenidas de diferentes ensayos son paralelas unas con otras, la respuesta a la descarga es muy rígida, con un índice de hinchamiento medio de $C_s=0.0075$.

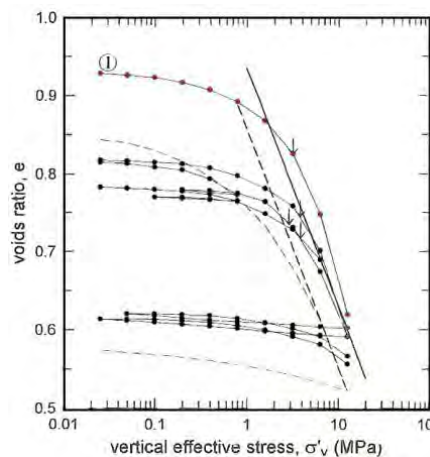


Fig. 3.57: Resultados de los ensayos edométricos en muestras naturales y remoldeadas de *Pozzolana Nera*. Cecconi y Viggiani (1998).

Las muestras remoldeadas tenían un índice de huecos de 0.849. Su comportamiento bajo compresión (curva discontinua de la Fig. 3.57), es significativamente menos rígido que el de las muestras naturales, con fluencia muy gradual. A grandes valores de esfuerzos efectivos, sin embargo, las muestras remoldeadas definen una línea de compresión noval que es paralela a la línea definida por la mayoría de las muestras naturales. Un comportamiento similar ha sido observado, para muestras naturales y remoldeadas de las tobas homogéneas “Grano Fino”, por Aversa (1991).

Las autoras señalan que la razón por la que algunas muestras naturales traspasan la línea de compresión normal de muestras remoldeadas, es debido a que se trata de materiales estructurados, tal y como señalaba también Aversa (1993). Según Leoroueil & Vaughan (1990), la fluencia corresponde al comienzo de la desestructuración concebido como la pérdida de los enlaces entre partículas.

2. Ensayos triaxiales:

El comportamiento es muy similar al de muchas rocas blandas, tales como tobas (Aversa et al., 1991), calcarenitas (Lagioia, 1996) y calizas (Elliot y Brown, 1985). Como se ha visto anteriormente, para el caso de bajas presiones de confinamiento (Fig. 3.58), el pico está seguido por un rápido decrecimiento del esfuerzo desviador hacia un estado último donde la razón de dilatancia es cero.

Para altas presiones de confinamiento (Fig. 3.58), las curvas de esfuerzo-deformación inicialmente son rígidas hasta un punto de fluencia, el cual ocurre a valores similares de deformación tangencial como aquellas correspondientes a la tensión desviadora de pico de las muestras ensayadas a baja presión de confinamiento. Después de la fluencia, el esfuerzo desviador continúa aumentando y alcanza un pico suave a deformaciones tangenciales de 7 a 13%. El comportamiento deformacional de reblandecimiento está acompañado por deformaciones volumétricas contractantes.

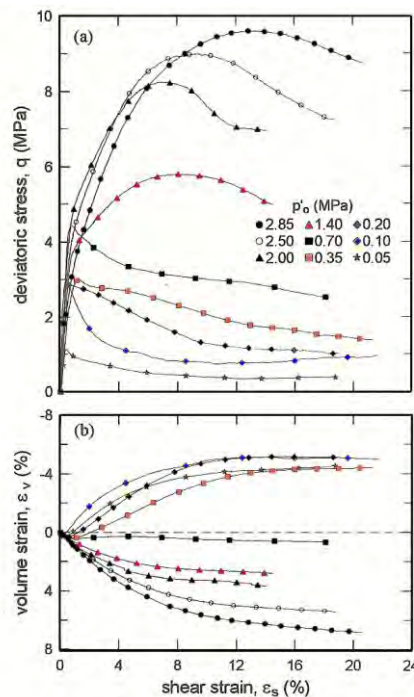


Fig. 3.58: Ensayos de compresión triaxial drenados con aumento de la presión de confinamiento: a) Relación tensión-deformación, b) Relación deformación cortante-deformación volumétrica. Cecconi y Viggiani (1998).

La siguiente figura (Fig. 3.59), es similar a la Fig. 3.62 pero dibujada en términos de $\epsilon=q/p'$. Como se puede observar, al final del ensayo las muestras ensayadas a altas presiones de confinamiento y que alcanzan una rotura de una forma dúctil, tienden a movilizar un valor bien definido de razón de esfuerzos: $M=1.57$.

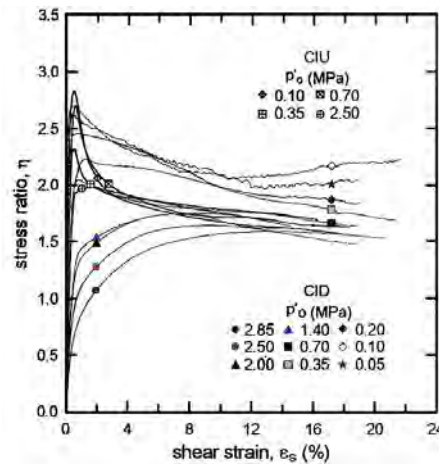


Fig. 3.59: Relación de esfuerzo vs. Deformación cortante de los ensayos de compresión triaxial drenados y no drenados. Cecconi y Viggiani (1998).

Resistencia:

Para el análisis de la resistencia al corte de los materiales, los autores utilizaron los parámetros de Hill q y p' ($q = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)$; $p' = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$).

Los estados últimos de esfuerzos siguen una línea recta que pasa por el origen (Fig. 3.60). El mejor ajuste obtenido para la resistencia última es $q=0.623s'$, que corresponde a un ángulo de fricción de $\phi'_{cv}=38.5^\circ$. El ajuste de los datos de pico se realizó mediante un polinomio de segundo orden, dando como resultado un $q'_0=0.256$ MPa (o $c'_p = \frac{q'_0}{\cos \phi'_p}=0.358$ MPa) y un ángulo de fricción pico $\phi'_p = 44.4^\circ$.

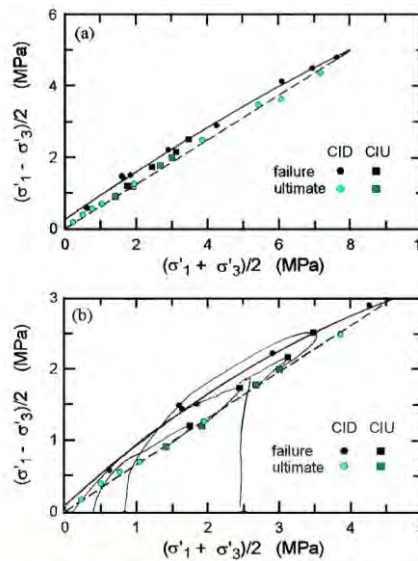


Fig. 3.60: Envolvente de la resistencia de ensayos de compresión triaxial: a) Rango completo de presiones, b) detalle a bajas presiones de confinamiento. Cecconi y Viggiani (1998).

3. Toba Orvietto:

a. Introducción

Tommasi y Ribacchi (1998), en primer lugar, realizan una descripción de la textura y características mineralógicas de las tobas Orvietto, las cuales pueden influir en el comportamiento del material y, en segundo lugar, estudian el comportamiento esfuerzo-deformacional de estos materiales y su superficie de fluencia.

b. Material de estudio

La ciudad de Orvieto se encuentra sobre los productos piroclásticos de la Toba de Orvietto y Bagnoregio (Fig. 3.61).

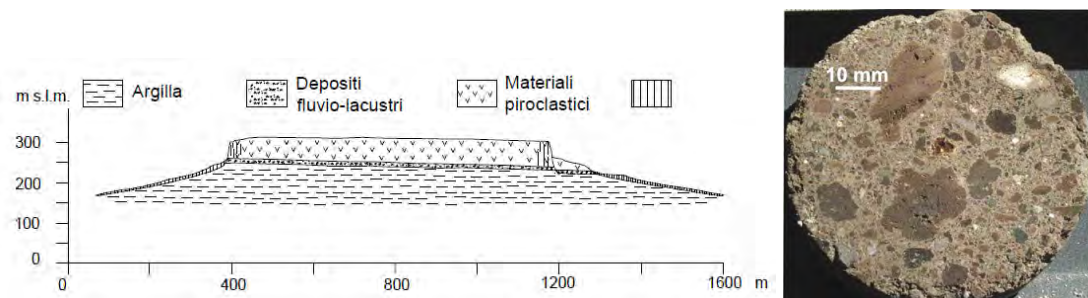


Fig. 3.61: Izda.: Esquema geológico N-S de la colina de Orvieto (Manfredini et al. 1980, mod.). Verrucci, 2011. Dcha.: Fotografía de la Puzzolana Nera.

La Toba Orvietto está compuesta por pumitas, fragmentos líticos y fenocristales, inmersos en una matriz de fondo gris.

El tamaño de las partículas de pómez varía desde unos pocos milímetros a varios centímetros, pero en el interior del depósito se encuentran también capas ricas en grandes pómez (hasta 100-200 mm). Los fragmentos líticos rara vez superan los 20-30 mm.

Se estudian tres facies dentro de las tobas de Orvietto:

1. Toba Roja (litificada)
2. Toba Amarilla (litificada)
3. Puzzolana gris (incoherente a débilmente litificado)

En estudios recientes, estos materiales han sido relacionados con 3 unidades deposicionales distintas (Faraone & Stoppa, 1988):

- Una toba lítica inferior, depositada como un flujo piroclástico húmedo.

- Una puzolana intermedia depositada como un flujo piroclástico seco.
- Una toba lítica superior, depositada como un flujo piroclástico húmedo.

Las tobas rojas y amarillas están formadas por pumitas y fragmentos líticos de diferentes tamaños (de unos pocos milímetros a algunos centímetros) englobados en un matriz vidriosa altamente porosa con intercalaciones de cenizas, fragmentos de pumita, cristales, óxidos de hierro.

La alta porosidad (46-57%) es debida a los poros y huecos tabulares dentro de las pumitas, así como a los huecos diseminados por toda la masa vítrea.

c. Ensayos y Resultados

Los ensayos realizados están resumidos en la Tabla 3.14. Estos ensayos se llevaron a cabo con diferentes grados de humedad.

Tabla 3.14: Ensayos realizados por Tommasi y Ribacchi (1998) en las tobas de Orvietto.

MUESTRAS	CONDICIONES DE HUMEDAD		
	Seca (40°C)	Ambiente (7-10%)	Mojada (Amarilla, 88%-94%; y Roja, 79-93%)
Toba amarilla Φ=54 mm	CSP Triaxial Brasileño	CSP Brasileño	CSP Brasileño
Toba roja Φ=54 mm	CSP Triaxial Brasileño	CSP Brasileño	CSP Brasileño
Toba roja Φ=60 mm	CSP Triaxial	E. de tracción uniaxial CSP	E. de tracción uniaxial CSP
Toba roja Φ=76 mm	-	E. de tracción uniaxial CSP Brasileño	E. de tracción uniaxial CSP Brasileño

Todas las muestras se secaron a 40°C. Después algunas se saturaron hasta 88-94% y 79-93%, para las tobas amarillas y rojas respectivamente. El grado de saturación S_r , con humedad ambiente, varía desde 7 a 10% tanto para las amarillas como para las rojas.

Los ensayos triaxiales se llevaron a cabo en probetas secas a 40°C tanto en la célula de Hoek ($\zeta_3 > 1.5$ MPa) como en celdas de gran diámetro para ensayar suelos ($\zeta_3 < 1$ MPa).

La porosidad está bien correlacionada con la resistencia a tracción (ζ_t) y la resistencia a compresión (ζ_c) (Fig. 3.62 y Fig. 3.63), así como también con el módulo elástico E_t (Fig. 3.64) y la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (Fig. 3.65) (Tommasi, 1998). En estas gráficas también se observa que la humedad de las muestras causa una disminución de la resistencia a la tracción y compresión para ambos litotipos, así como también una caída del módulo de Young en las tobas rojas.

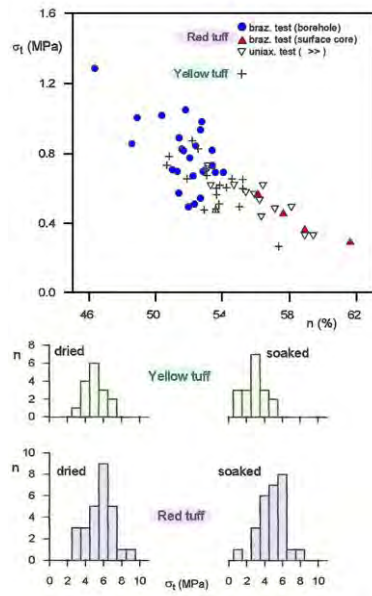


Fig. 3.62: Resistencia a tracción, σ_t , de ensayos brasileños versus porosidad n para muestras con humedad ambiente e histogramas de σ_t para muestras secas y mojadas. (Tommasi y Ribacchi, 1998).

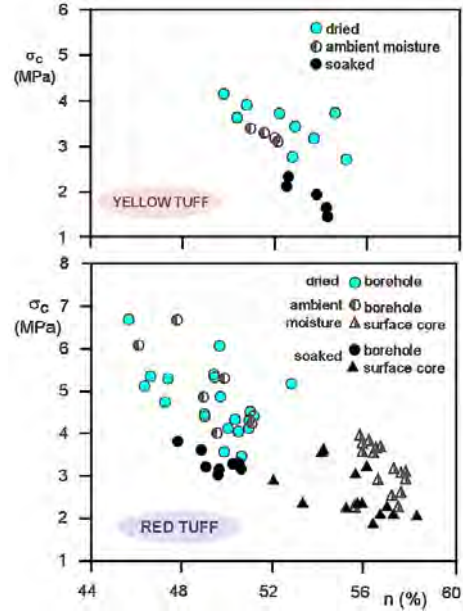


Fig. 3.63: Resistencia compresión uniaxial σ_c vs. Porosidad n para muestras con humedad ambiente, secas y mojadas. (Tommasi y Ribacchi, 1998).

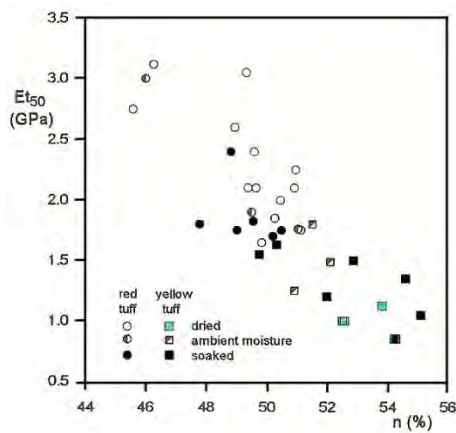


Fig. 3.64: Módulo tangente de Young al 50% de la resistencia a compresión simple (E_{t50}). Tommasi y Ribacchi, 1998.

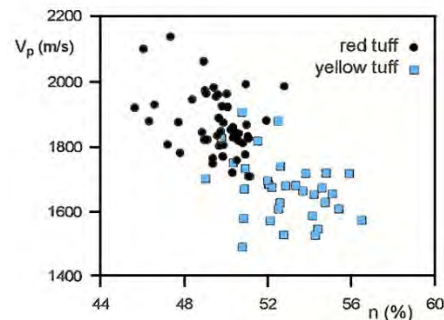


Fig. 3.65: Velocidad de las ondas longitudinales versus porosidad, n . Tommasi y Ribacchi, 1998.

Comportamiento esfuerzo-deformacional:

A pesar de que se trata de un material heterogéneo, las curvas de esfuerzo-deformación son bastantes regulares y están algo influenciadas por las condiciones de humedad (Fig. 3.66).

La influencia de la presión de confinamiento en el comportamiento esfuerzo-deformacional es similar al observado en las tobas “Grano Fino” (Aversa & Evangelista, 1997). Se observa un comportamiento frágil sólo a bajas presiones de confinamiento (Fig. 3.67). En las tobas rojas la transición del comportamiento frágil al dúctil ocurre a valores de ζ_3 (4MPa) mayores que en las tobas amarillas (1.5 MPa), confirmando así el grado más débil de litificación de la última litología.

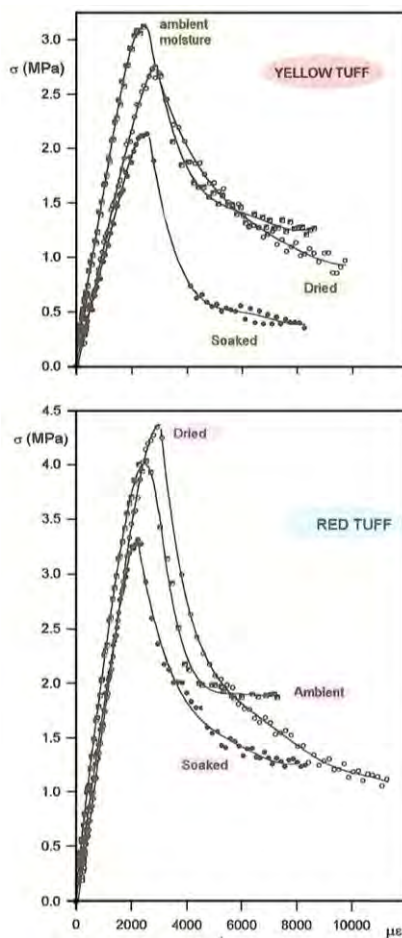


Fig. 3.66: Curvas deformación-tensión típica en ensayos uniaxiales. Tommasi y Ribacchi, 1998.

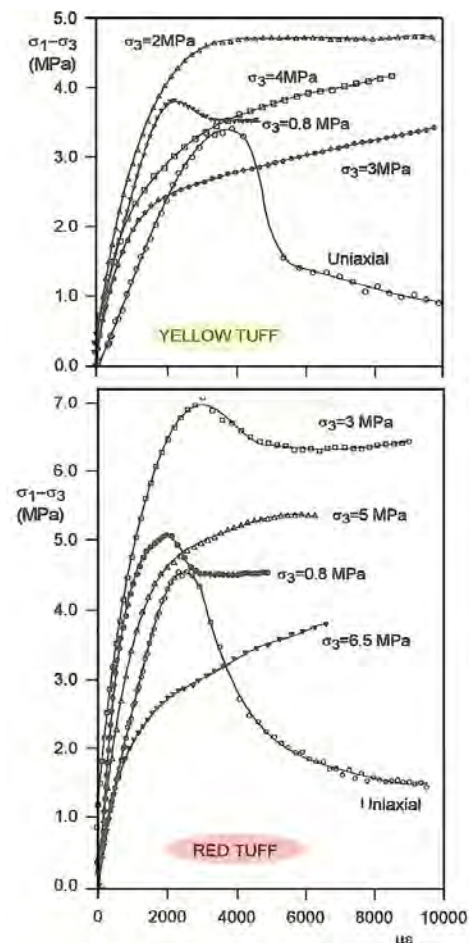


Fig. 3.67: Curvas esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales a varias presiones de confinamiento. Tommasi y Ribacchi, 1998.

La variación del módulo Young inicial en el estado de cargas desviadoras (Fig. 3.68), con diferentes valores de ζ_3 , sugiere que cargar de manera isótropa por encima de un nivel de esfuerzo determinado, puede dañar la estructura de la toba como lo

sugirieron Pellegrino & Evangelista (1990) para las tobas Amarillas Napolitanas. Esta hipótesis parece estar de acuerdo con la variación del módulo de compresibilidad K con el esfuerzo isotrópico (Fig. 3.69).

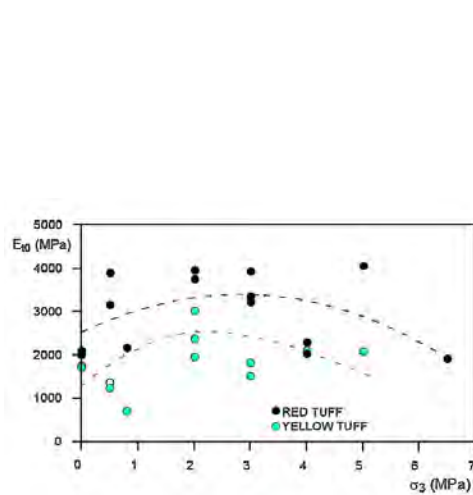


Fig. 3.68: Módulo de Young tangencial inicial en el estado de carga desviadora E_{t0} contra la presión de confinamiento. Tommasi y Ribacchi, 1998.

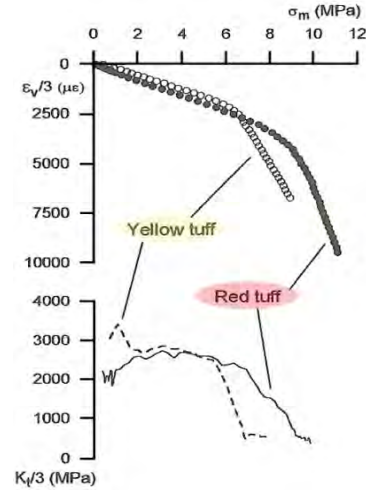


Fig. 3.69: Deformación volumétrica ϵ_v y módulo de compresibilidad K vs. Tensión isotrópica σ_m para ambas litología. Tommasi y Ribacchi, 1998.

Fluencia o Plasticidad:

En la Fig. 3.70 se muestran los valores de tensión de fluencia para ambas tobas sobre el plano ζ_1 - ζ_3 , junto con la envolvente de resistencia a grandes deformaciones.

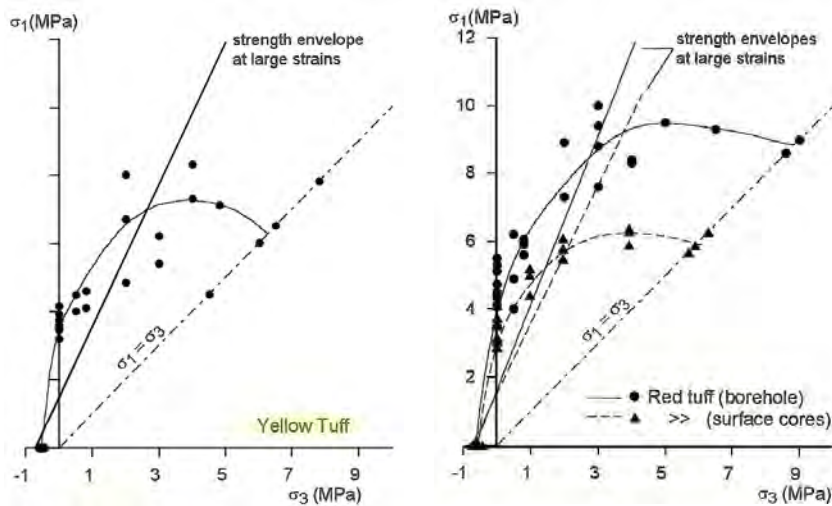


Fig. 3.70: Curvas de fluencia para las tobas amarillas y rojas. Tommasi y Ribacchi, 1998

Los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- La toba Roja está caracterizada por tener menor porosidad, mayor resistencia y menores deformaciones que las Amarillas.
- El módulo elástico y la fragilidad están influenciados por el grado de saturación.
- Las presiones de confinamiento influyen en el comportamiento esfuerzo-deformacional incluso a valores bajos de tensión lateral.
- La forma general de la superficie de fluencia de estos materiales en el plano $\zeta_1 - \zeta_3$ está caracterizada por un gradiente inicial muy pronunciado entre las condiciones de tracción y las presiones de confinamiento bajas. Al aumentar las tensiones de confinamiento la curva de fluencia se aplanan gradualmente y posteriormente disminuye ligeramente en la zona cercana a las condiciones isotropas; la tensión de fluencia en condiciones isotropas es de aproximadamente 1.7 a 2 veces la resistencia a compresión simple.

4. Depósitos de caída del “Mount Vesuvius”:

a. Introducción

Esposito y Guadagno (1998) estudian el comportamiento de los clastos de pumitas, los cuales son los componentes mayoritarios de los materiales piroclásticos; tales materiales fueron definidos por Fisher y Schmincke (1984) como vidrio altamente vesiculado. Los autores presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo para determinar las propiedades de la pumita y el comportamiento relacionado con estos depósitos.

b. Material de estudio

Los ensayos se llevaron a cabo en 5 muestras de pumita recogidas de los depósitos de caída de la erupción del año 79 del “Mount Vesuvius” (Fig. 3.71). Las capas de “pumita blanca” tienen una composición fonolítica aunque presentan algunos elementos líticos (Sigurdsson et al., 1985; Lirer et al., 1993).

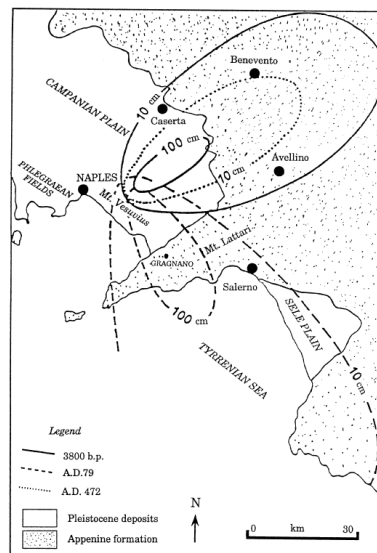


Fig. 3.71: Mapa geológico esquemático que muestra los depósitos de caída de las erupciones plinianas típicas, Somma-Vesuvius. Esposito y Guadagno (1998).

c. Ensayos y Resultados

Se determinaron las propiedades índices y físico-volumétricas: peso específico de las partículas (γ_s), densidad seca (γ_d), porosidad (n), índice de poros (e) de las pumitas. Estas propiedades se calcularon para las partículas de cada fracción de tamaño de grano. El volumen de las partículas de mayor tamaño se determinó mediante inmersión en mercurio y el volumen de las más pequeñas se obtuvo mediante la

técnica del picnómetro usando partículas saturadas.

La distribución del tamaño de los poros se determinó usando el porosímetro de mercurio.

También se realizó una microscopía electrónica de barrido, utilizando el Stereoscan Cambridge. Las imágenes se utilizaron para obtener las mediciones de superficies específicas mediante fractales.

Los autores llevaron a cabo ensayos de hundimiento consistentes en sumergir las partículas de pómez en agua durante diferentes periodos de tiempo, con el fin de conocer el comportamiento de las pumitas cuando entran en contacto con el agua. Se determinó la variación del contenido en agua y el porcentaje de pómez hundida como una función del tiempo.

Resultados:

En la Fig. 3.72 se observa la distribución del tamaño de grano obtenida de las 5 muestras. El material puede clasificarse como arena/grava con un coeficiente de uniformidad (Cu) entre 68 y 92 y un diámetro eficaz (D10) de 0.6-0.11. El histograma de la Fig. 3.73 muestra la distribución unimodal de las muestras, las cuales pueden ser vistas como típica de los piroclastos de caída.

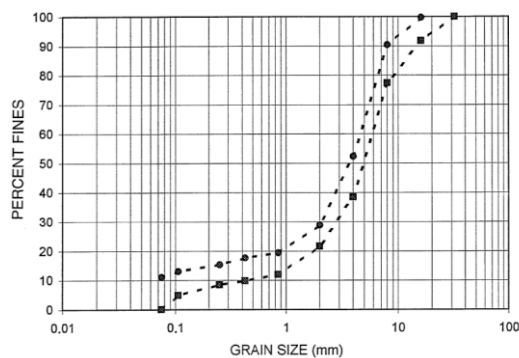


Fig. 3.72: Distribución del tamaño de grano para los depósitos ensayados. Esposito y Guadagno (1998).

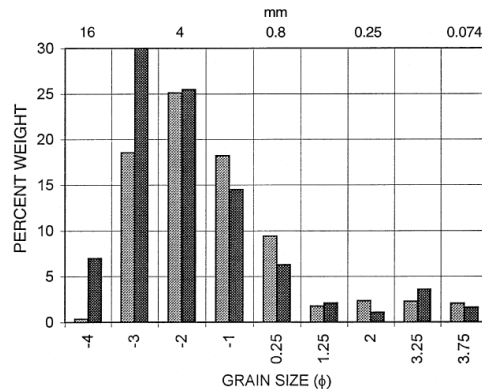


Fig. 3.73: Histogramas de la distribución del tamaño de grano de los depósitos estudiados. Esposito y Guadagno (1998).

La Tabla 3.15 resume los resultados de algunas mediciones geotécnicas. Un mínimo de 20 elementos fueron analizados para cada fracción de tamaño de grano individual identificados en las 5 muestras.

Tabla 3.15: Valores promedios de las propiedades de masa-volumen del análisis de muestras. Esposito y Guadagno (1998).

Diámetro (mm)	G_s	γ_s (kN/m ³)	γ_{psp} (kN/m ³)	(n) Porosidad determinada mediante la relación peso- volumen (%)	e	(n) Porosidad determinada mediante porosímetro de mercurio (%)	(n) Porosidad determinada mediante agua absorbida (%)
16	2.48	6.1	6.1	75	2.98	-	67
8	2.52	6.3	6.2	74	2.94	42	68
4	2.55	6.6	6.5	73	2.81	49	70
2	2.58	7.1	6.8	71	2.58	-	70
0.85	2.62	7.5	7.0	70	2.45	-	69

Las mediciones del porosímetro se llevaron a cabo en clastos con tamaños de 4 y 8 mm. El resultado dio valores entre el 42 y el 49%. La comparación de los valores obtenidos mediante el método peso/volumen y los obtenidos por el porosímetro (Tabla 3.15) indica que la inclusión en mercurio subestima la presencia de huecos en los clastos pumíticos.

También es interesante observar que los valores de porosidad determinados al final del ensayo de hundimiento (y por tanto a través del volumen de agua absorbida en peso constante) es más baja que los valores calculados por medio de la relación peso/volumen. El efecto parece ser más pronunciado en las pumitas más grandes, sugiriendo que esto puede estar asociado con el aire atrapado en el gran número de huecos internos.

La Tabla 3.16 compara la superficie específica estimada de las mediciones del porosímetro con las obtenidas con el análisis fractal, en aquellos granos de tamaño de 4 y 8 mm. En cada caso, los resultados del análisis fractal son entre un 30 y un 40 % superiores. La superficie específica de las pumitas dependerá del diámetro del clasto; los huecos son más pequeños en las partículas más pequeñas.

Tabla 3.16: Análisis de la superficie específica obtenida mediante fractal y el porosímetro. Esposito y Guadagno (1998).

Diámetro (mm)	Superficie específica desde análisis fractal (m ² /g)	Superficie específica desde porosímetro (m ² /g)
8	10.8	7.43
4	11.5	8.71

Teniendo en cuenta que las mediciones del porosímetro subestiman la presencia de huecos de pequeñas dimensiones, la prueba sugiere que el análisis matemático fractal daría una aproximación más realista de la superficie expuesta.

Comportamiento en contacto con el agua:

Debido a su baja densidad, las pumitas pueden flotar cuando se depositan en el agua. El hundimiento de los clastos de pumitas es debido a la intrusión de agua dentro de sus poros. La Fig. 3.74 muestra la variación progresiva del peso de los clastos (g) de diferentes tamaños cuando ellos se colocan en el agua durante el ensayo de hundimiento.

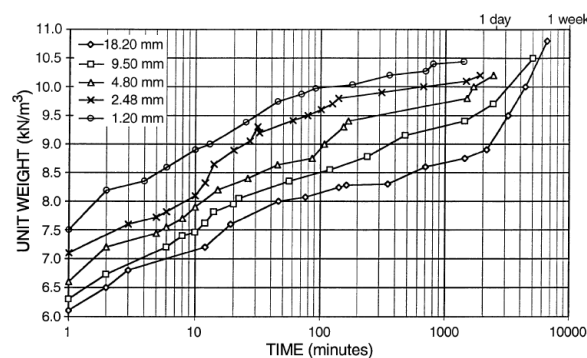


Fig. 3.74: Variación del peso de los clastos durante el ensayo de hundimiento. Esposito y Guadagno (1998).

El proceso de penetración de agua está regulado por las fuerzas de capilaridad.

Discusión:

Los ensayos de laboratorio confirman que los depósitos de pómez deben ser tratados como un material geotécnico particular, debido a la presencia tanto de huecos intra-partículas como inter-partículas.

Las pómez secas y las que tenían un 80% de agua fueron sometidas a un proceso de cementación; los resultados extremos fueron $\zeta_c=25\text{kPa}$ para el material seco y $\zeta_c=600\text{kPa}$ para el parcialmente saturado. Estos hallazgos fueron apoyados por microscopio electrónico de barrido, SEM (Foto 3.6) el cual destacó la metamorfosis de vidrio volcánico en minerales de la zeolita de las pumitas parcialmente saturadas; sin duda causada por el calor generado durante el proceso de endurecimiento.

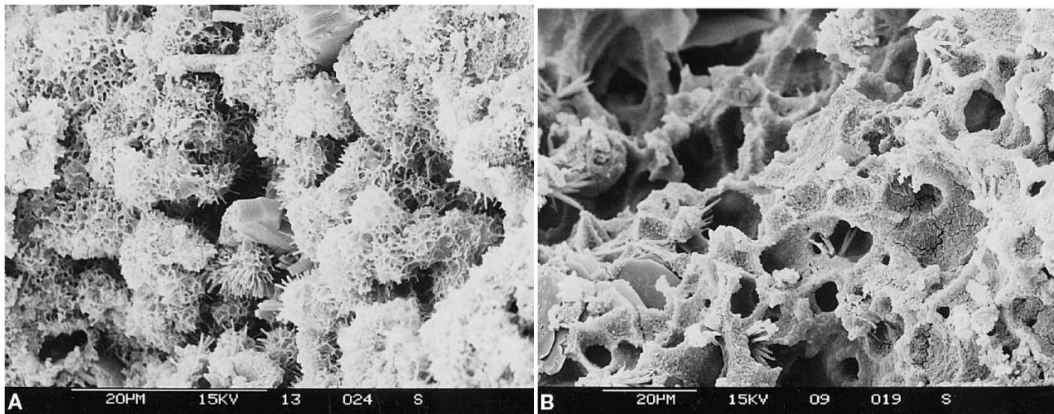


Foto 3.6: Fotografía SEM, mostrando (A) materiales pumíticos húmedos cementados y (B) secos. Esposito y Guadagno (1998).

Esto es un tema a tener en cuenta a la hora de estabilizar este tipo de suelo.

Los autores concluyen que los suelos pumíticos pueden ser considerados como únicos en el panorama de los materiales geotécnicos. Su comportamiento está influenciado por la presencia de dos tipos de poros: los poros de las partículas y los poros entre los granos. Se ha demostrado que esto puede causar diferencias en los parámetros físicos y volumétricos así como en el comportamiento de los suelos. La penetración del agua en los poros de las partículas modifica significativamente la relación peso/volumen y da lugar a un aumento en el peso de las partículas. Además de la influencia sobre el comportamiento dinámico del material, esto tendrá un efecto importante en el desarrollo de las presiones de los poros y en la efectividad de los tratamientos para mejorar las características mecánicas del suelo.

Los autores consideran que la presencia de los huecos inter e intra-partículas dentro de las pumitas es la principal causa del comportamiento inusual y aparentemente anómalo de estos materiales.

3.2.3 GRUPO CANADIENSE

3.2.3.1 Año 1975

a. Introducción

Wong y Mitchell (1975) realizaron ensayos triaxiales drenados con diferentes trayectorias de esfuerzos y ensayos de deformación plana en unas arcillas débilmente cementadas.

En este estudio se propone un enfoque teórico para el análisis del comportamiento esfuerzo-deformacional de muestras triaxiales orientadas verticalmente.

Los autores estudiaron el fenómeno de fluencia de la estructura usando los parámetros de esfuerzos efectivos p y q de Cambridge (similares a los de Roscoe et al. (1958)). Dichos parámetros se definen de la siguiente manera:

$$p = p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]^{1/2}$$

Siendo σ'_1 , σ'_2 , σ'_3 los esfuerzos principales efectivos.

La razón de esfuerzo η viene dada por:

$$\eta = \frac{q}{p}$$

Teniendo en cuenta que los ensayos se llevaron a cabo bajo condiciones de carga axisimétricas con $\sigma'_2 = \sigma'_3$, resultan los parámetros:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \tag{1}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \tag{2}$$

b. Materiales estudiados

Los autores basaron su estudio en unas arcillas sensibles cementadas procedentes de los depósitos del Lago Champlain al Este de Canadá.

c. Ensayos y Resultados

Los ensayos triaxiales se llevaron a cabo con pequeños incrementos de carga diarios y permitiendo la disipación de la presión intersticial.

Los tipos de ensayos triaxiales fueron (ver Fig. 3.75):

- CC (presión de confinamiento constante)
- CN ($\epsilon \left(\frac{q}{p'}\right)$ constante)
- CP (p constante)
- CV (Esfuerzo axial constante) aumento de σ'_3 , trayectoria negativa.
- SU (consolidado- no drenado)

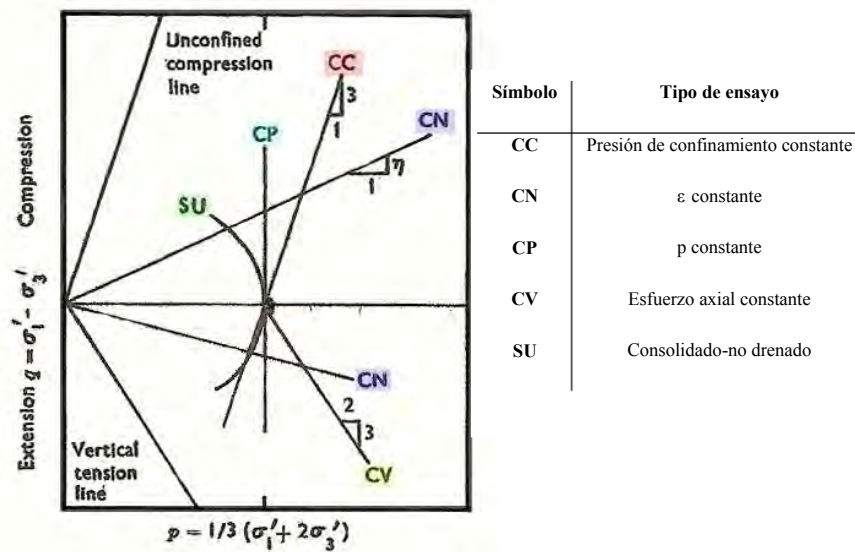


Fig. 3.75: Ensayos triaxiales con trayectorias de esfuerzos efectivos. Wong y Mitchell (1975).

Los parámetros de deformación que se usaron están definidos de forma similar a los parámetros de esfuerzo p y q . La deformación volumétrica v y la deformación debida a la distorsión $\bar{\epsilon}$ vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$v = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2}$$

Dichas formulas, teniendo en cuenta la condición de carga axi-simétrica, para el caso de compresión, toman la siguiente forma,

$$v = (\epsilon_1 + 2\epsilon_3)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3) = \epsilon_1 - \frac{v}{3}$$

Para el caso de extensión, las formulas serían:

$$v = (2\epsilon_1 + \epsilon_3)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3) = 2\epsilon_1 - \frac{2v}{3}$$

Los parámetros de incrementos de deformación se definen, de manera similar, por:

$$\delta v = (\delta\epsilon_1 + \delta\epsilon_2 + \delta\epsilon_3)$$

$$\delta\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}[(\delta\epsilon_1 - \delta\epsilon_2)^2 + (\delta\epsilon_2 - \delta\epsilon_3)^2 + (\delta\epsilon_3 - \delta\epsilon_1)^2]^{1/2} \quad (3)$$

Las ecuaciones (1), (2) y (3) satisfacen la ecuación de trabajo:

$$\delta w = \sigma'_1\delta\epsilon_1 + \sigma'_2\delta\epsilon_2 + \sigma'_3\delta\epsilon_3 = p\delta v + q\delta\bar{\epsilon}$$

En la Fig. 3.76 se muestran las curvas obtenidas de los diferentes tipos de ensayos, donde el punto de fluencia se define extrapolando los dos segmentos lineales de la curva esfuerzo-deformación.

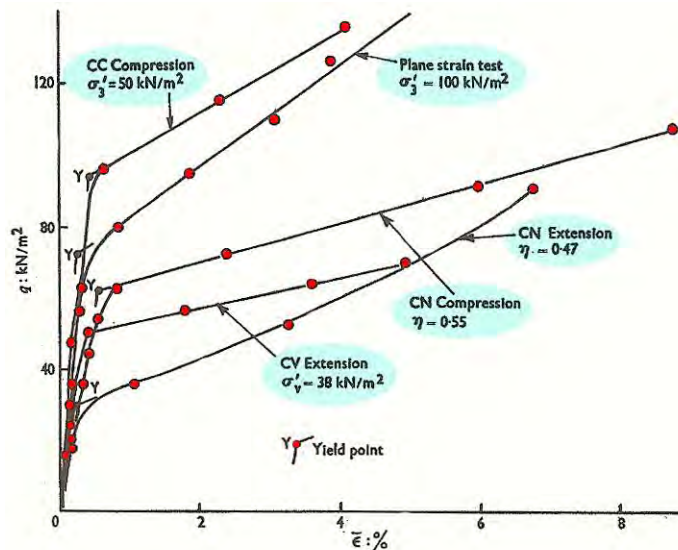


Fig. 3.76: Curvas de esfuerzo-deformación. Wong y Mitchell (1975).

Comportamiento cuasi-elástico pre-fluencia:

Como primera aproximación, las arcillas sensibles pueden ser tratadas como un material cuasi-elástico isótropo, cuyo comportamiento puede ser descrito por una teoría de deformación lineal, en la que participan sólo dos parámetros independientes, que pueden ser el módulo de Young E' y módulo de Poisson ν' . Estos parámetros se evaluaron mediante los ensayos drenados con diferentes

trayectorias de esfuerzos. Los resultados obtenidos fueron,

$$E' = 10 \text{ MN/m}^2 - 25 \text{ MN/m}^2$$

$$\nu' = 0.20 \text{ a } 0.30$$

Los valores más bajos de E' se encuentran a bajas presiones de confinamiento, así como también a presiones cercanas a la presión de preconsolidación isotrópica (p_0).

La presencia de micro fracturas y planos de debilidad inherentes pueden afectar al comportamiento esfuerzo-deformación de las arcillas a bajas presiones.

Envolvente de fluencia o plastificación:

Por definición, la envolvente de fluencia es un contorno o límite que separa la región plástica de la región teórica de linealidad.

Wong y Mitchell (1975) definieron, con los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales tanto de compresión como de extensión, una curva de fluencia para los materiales de estudio. La Fig. 3.77 muestra dicha curva y en esta se observa que la curva de fluencia experimental no es simétrica con respecto al eje p . Con esto se concluye que la fluencia de estas arcillas no es isotrópica.

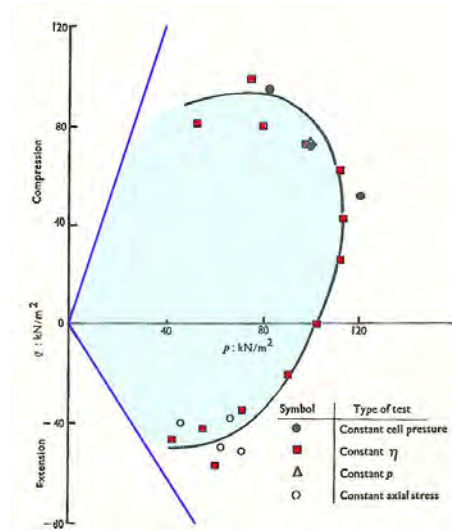


Fig. 3.77: Fluencia en el plano p-q para muestras verticales. Wong y Mitchell (1975).

Los autores formularon un modelo plástico, para describir y predecir el comportamiento esfuerzo-deformación post-fluencia de las arcillas débilmente cementadas, desde los datos de los ensayos realizados. Está basado en el trabajo de Roscoe et al (1958) y Roscoe and Schofield (1963), pero introducen una modificación para las arcillas estudiadas.

Modelo plástico propuesto:

De acuerdo con la teoría de estado crítico desarrollada por Roscoe et al. (1958) y Roscoe y Shofield (1963), un suelo normalmente consolidado puede ser descrito como un material elástico isótropo con rigidización plástica. El incremento de deformación volumétrica plástica δv^p está relacionado con el índice de compresión C_c . De la ecuación de trabajo se obtiene:

$$p\delta v^p + q\delta\bar{\epsilon}^p = f(p, M, \delta v^p, \delta\bar{\epsilon}^p)$$

Donde M es una constante relacionada con la propiedad friccional del suelo.

Como se observa en la Fig. 3.78, la condición de normalidad no puede ser aplicada a las arcillas.

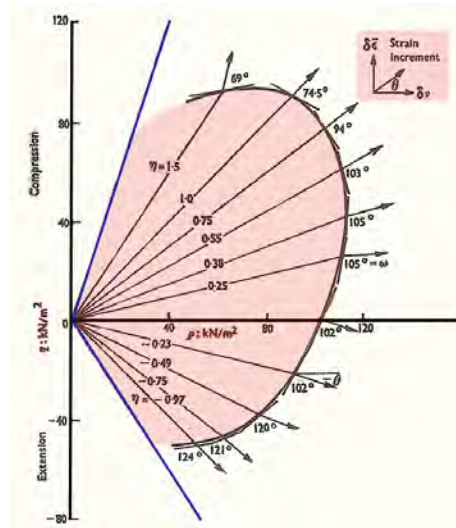


Fig. 3.78: Evaluación experimental de la condición de normalidad. Wong y Mitchell (1975).

De acuerdo con el enfoque de la Cam-Clay (Roscoe and Schofield, 1963) o de la Cam-Clay modificada (Roscoe and Schofield, 1968), la curva de fluencia para un suelo se obtiene de una ecuación de trabajo teórica asumiendo la condición de normalidad entre el vector incremento de deformación plástica y la superficie de fluencia. Pero esto no es válido para las arcillas cementadas. La formulación analítica del modelo de plasticidad que se propone en este estudio está basado en una regla experimentalmente definida, la cual relaciona la razón del incremento de deformación plástica ($\frac{\delta\bar{\epsilon}^p}{\delta v^p}$) con la razón de esfuerzos efectivos (ϵ) y no se hacen suposiciones sobre la disipación del trabajo o de la normalidad.

De los resultados obtenidos de las mediciones de deformación volumétrica y axial, los autores vieron que estos datos se ajustaban bien a las siguientes ecuaciones

empíricas:

Para compresión triaxial:

$$\left(\frac{\delta\bar{\epsilon}}{\delta v}\right)^p = 1.35\eta - 0.26 \quad \text{para } \epsilon \leq 1$$

$$\left(\frac{\delta\bar{\epsilon}}{\delta v}\right)^p = \frac{0.54}{1.5-\eta} \quad \text{para } \epsilon \geq 1$$

Para extensión triaxial:

$$\left(\frac{\delta\bar{\epsilon}}{\delta v}\right)^p = \frac{-0.312}{1.2-|\eta|} \quad \text{para } |\eta| \geq 0$$

Si se considera un material plástico en el cual el trabajo se disipa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta w^p = p\delta v^p + q\delta\bar{\epsilon}^p = p(bM\delta\bar{\epsilon}^p + c\delta v^p)$$

Donde b y c son constantes. Si se reordena la ecuación anterior se obtiene:

$$\left(\frac{\delta\bar{\epsilon}}{\delta v}\right)^p = \frac{1-c}{bM-\eta}$$

que es muy parecida a la que se obtuvo como aproximación de los datos.

Para las arcillas cementadas M tiene valor de 1.08 y 0.80 para compresión y extensión, respectivamente.

A diferencia de un material ideal Cam Clay (donde $c=0$ y $b=1$ tanto para extensión como compresión), para las arcilla cementadas, los autores obtuvieron los siguientes valores de b y c: para el caso de compresión triaxial $\epsilon \geq 1$, $b=1.4$ y $c=0.46$; y para extensión triaxial $b=1.5$ y $c=0.69$.

La teoría de Cam-Clay modificada considera el trabajo disipado en el cambio de volumen de plástico y genera una relación de tensión de incremento de plástico dada por:

$$\left(\frac{\delta\bar{\epsilon}}{\delta v}\right)^p = \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2}$$

Curvas de fluencia y función potencial plástica:

Drucker (1959) postuló que la energía no puede extraída de un material estable durante la deformación. Entonces:

$$\delta p\delta v^p + \delta q\delta\bar{\epsilon}^p \geq 0$$

La condición de normalidad se mantiene si el signo de igualdad en la ecuación anterior se cumple cuando una pequeña tensión causa cambios de un valor límite de q a un valor adyacente sin más fluencia (Roscoe y Schofield, 1963). En general, sin embargo, el potencial plástico no coincide con la superficie de fluencia y la desigualdad se sostiene. Por tanto,

$$\delta p \delta v^p + \delta q \delta \epsilon^p = C_1 \quad (4)$$

Donde C_1 es una cantidad positiva que puede depender del estado de esfuerzo pero no está relacionada con el endurecimiento deformacional. Por tanto, se asume que C_1 es independiente del incremento de tensiones aplicado.

En términos diferenciales la ecuación (4):

$$\frac{\delta \epsilon^p}{\delta v^p} + \frac{\delta p}{\delta q} = C$$

Entonces:

$$\frac{1}{\psi} = -\frac{dp}{dq} = \frac{\delta \epsilon^p}{\delta v^p} - C \quad (5)$$

Donde $-\psi$ es la pendiente de la curva de fluencia en un punto dado y C es una medida de la diferencia entre la pendiente de la función potencial plástica y la curva de fluencia en un punto considerado. La ecuación (5) difiere con el modelo de Cam-Clay porque no se asume que el vector incremento de deformación debe ser perpendicular a la curva de fluencia. Con este enfoque es posible satisfacer los datos experimentales presentados en la Fig. 3.76.

Por definición:

$$q = \eta p$$

Derivando la ecuación anterior:

$$\frac{dq}{dp} = \eta + p \frac{d\eta}{dp} = -\psi$$

y,

$$\frac{dp}{p} + \frac{d\eta}{\psi + \eta} = 0$$

La curva de fluencia en el espacio q - p , está dada por la siguiente ecuación diferencial:

$$\ln p - \ln p_0 + \int_0^\eta \frac{d\eta}{\psi + \eta} = 0$$

Donde p_0 es el valor de p en $\varepsilon=0$ y es la presión de preconsolidación isotropa. Para las arcillas ensayadas, p_0 es 103 kN/m² para la fluencia inicial.

En la Fig. 3.78 el valor de C puede ser calculado como $C = \tan(\omega - 90^\circ) [1 + \tan \theta \tan(90^\circ + \theta - \omega)]$. Sobre un amplio rango de valor de ε donde la pendiente de la curva de fluencia experimental está bien definida ($-0.25 < \varepsilon < 0.75$), el valor de C es casi constante e igual a 0.25.

Asumiendo que $C=0.25$, la función de Ψ puede expresarse como:

$$\begin{array}{lll} \frac{1}{\psi} = 1.35\eta - 0.51 & \text{para } 0 \leq \varepsilon \leq 2 & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{Compresión Triaxial.} \\ \frac{1}{\psi} = \frac{0.54}{1.5-\eta} - 0.25 & \text{para } \varepsilon \geq 1 & \\ \frac{1}{\psi} = \frac{-0.312}{1.2-|\eta|} - 0.25 & \text{para } |\eta| \geq 0 & \Rightarrow \text{Extensión Triaxial.} \end{array}$$

La ecuación de la curva de fluencia puede expresarse de la siguiente manera:

$$\log p = \log p_0 - F(\eta)$$

Donde:

$$F(\eta) = (\log_{10} e) \int_0^\eta \frac{d\eta}{\psi + \eta}$$

En la Fig. 3.79 se observa como existe una buena correlación entre la envolvente de fluencia teórica y los resultados experimentales. Por lo tanto, es evidente que el modelo de plasticidad propuesto da una predicción satisfactoria de la forma de la envolvente inicial de fluencia en un amplio rango de valores de ε de interés en problemas de asentamiento.

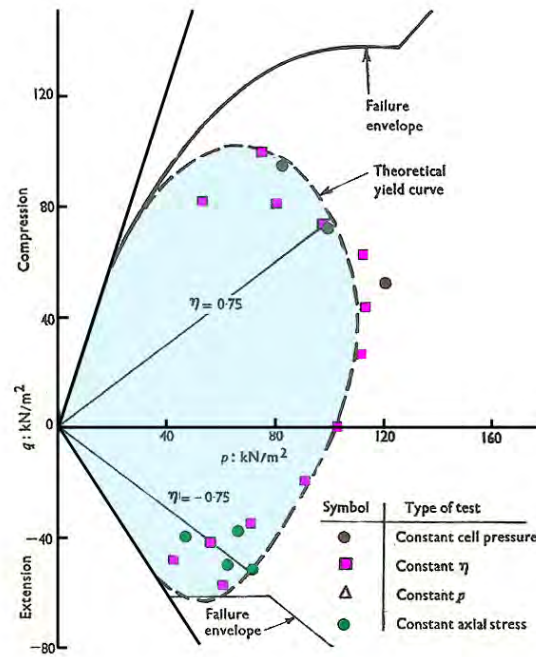


Fig. 3.79: Comparación de la envolvente de fluencia teórica con los resultados experimentales. Wong y Mitchell (1975).

3.2.4 GRUPO JAPONÉS

3.2.4.1 Año 1981

a. Introducción

Adachi, Ogawa y Hayashi realizaron ensayos de laboratorio en unas tobas porosas, denominadas “*Ohya Stone*”, para determinar las propiedades mecánicas de dichas rocas blandas y, además, el efecto de las discontinuidades en el comportamiento mecánico de las masas rocosas.

Los ensayos triaxiales de compresión se llevaron a cabo tanto en rocas intactas como en muestras con cortes tipo sierra y formando un ángulo variado con respecto al plano del máximo esfuerzo principal. Con los resultados de estos ensayos, los autores proponen un nuevo criterio de rotura para la resistencia de pico y residual de una roca intacta.

Aquí solo se van a mostrar los resultados en muestras intactas.

b. Material de estudio

El material de estudio (“*Ohya Stone*”) pertenece a la formación denominada Toba Verde, en Japón (Fig. 3.80 y Fig. 3.81). Esta toba está compuesta por depósitos piroclásticos marinos depositados durante la época del Mioceno. Su composición es de tipo riolítico y tiene una estructura porosa, con un tamaño de poro de aproximadamente 0.3 nm de diámetro.

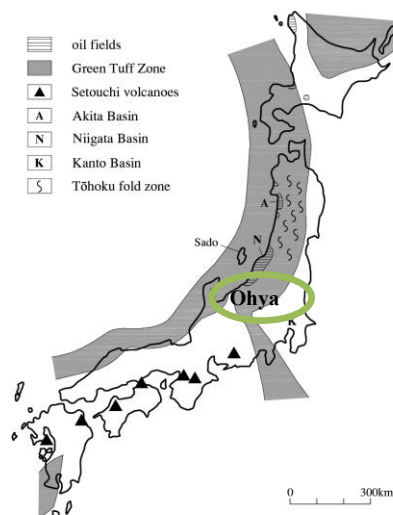


Fig. 3.80: Zona ocupada por las Tobas Verdes (después de Chigakudan 1995, fig. 3-1; Sugimora y Veda 1973, fig. 7.3).



Fig. 3.81: Dcha.: Toba Verde a lo largo de la costa oeste de la Isla de Sado (Gina L.Barnes, 2008). Izqda.: Ohya Stone.

Las propiedades físicas del material estudiado se presentan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17: Propiedades físicas de las tobas Ohaya Stone.

e	γ_d	γ_{ap}	G_s
0.72	14.4 kN/m ³	18.4 kN/m ³	2.48

c. Ensayos y Resultados

Los autores llevaron a cabo ensayos triaxiales drenados y no drenados, midiendo el cambio de volumen. Tanto los ensayos triaxiales drenados como los no drenados se realizaron con diferentes presiones de confinamiento.

Al igual que se ha visto anteriormente en diferentes materiales estudiados por otros autores, a bajas presiones de confinamiento, el desviador crece hasta alcanzar un punto máximo entonces los esfuerzos decrecen debido a deformaciones de reblandecimiento, y finalmente alcanza el estado de esfuerzo residual (Fig. 3.82). Obsérvese como a partir de una presión de confinamiento de 3MPa coinciden la resistencia de pico con la residual.

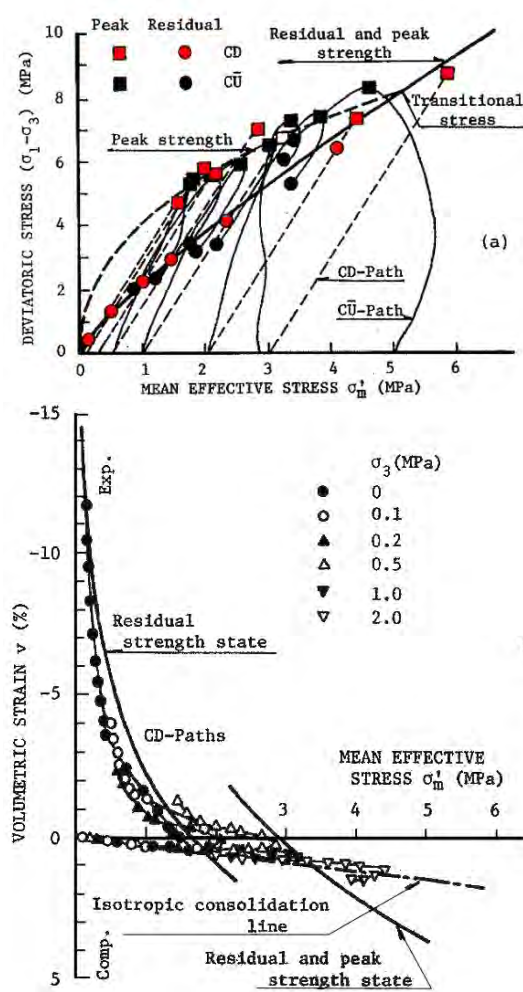


Fig. 3.82: Para presiones de confinamiento bajas, (a) Trayectoria de esfuerzos efectivos, (b) Relación entre los esfuerzos efectivos medios y la deformación volumétrica.

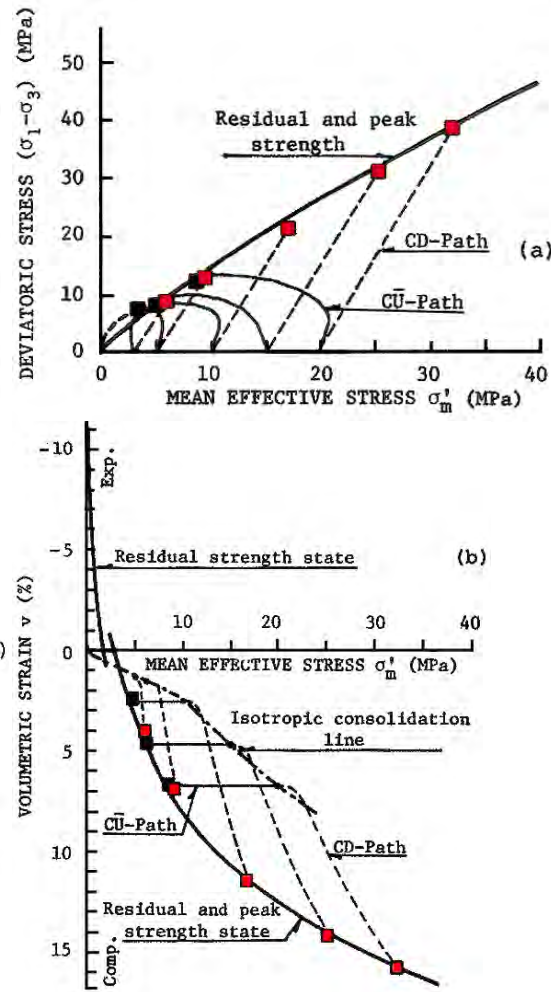


Fig. 3.83: Para altas presiones de confinamiento, (a) Trayectoria de esfuerzos efectivos, (b) Relación entre los esfuerzos efectivos medios y la deformación volumétrica.

Para el caso de altas presiones (Fig. 3.83), los esfuerzos aumentan monótonamente, y alcanzan el estado denotado por un cuadrado en la Fig. 3.83, donde la resistencia de pico es idéntica a la residual. Además, cuando la presión de confinamiento es mayor que 15 MPa, la trayectoria de esfuerzos efectivos en condiciones no drenadas es similar a la de las arcillas normalmente consolidadas.

El estado de esfuerzo donde la línea de resistencia de pico intercepta a la residual ($\sigma'_m = 5$ MPa, Fig. 3.82) se denomina la resistencia transicional. En cualquier estado de esfuerzo menor que el transicional, la relación esfuerzo-deformación es del tipo de deformación endurecimiento-reblandecimiento, de lo contrario es del tipo de deformación de endurecimiento, es decir, la resistencia de pico es idéntica a la residual.

De los resultados obtenidos, los autores concluyen que las resistencias de pico y

residual no solo están en función de la media de los esfuerzos efectivos y del desviador, sino que hay una relación única entre los esfuerzos y las deformaciones volumétricas. En otras palabras, no es suficiente describir el criterio de rotura de estos materiales solo por los esfuerzos; es necesario dar una relación entre el esfuerzo y la deformación como una condición adicional.

La relación entre la resistencia de pico (y/o residual) con la media de los esfuerzos efectivos no es lineal (como se puede observar en las Fig. 3.83 y Fig. 3.84), y como resultado de esto, el criterio de rotura de Mohr-Coulomb no puede ser aplicado por completo.

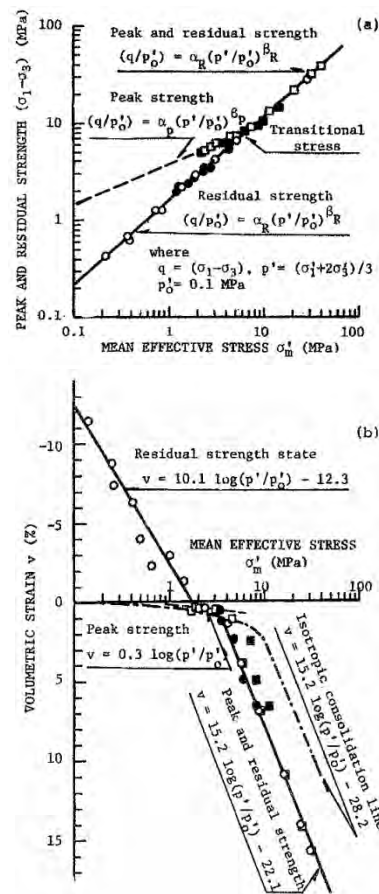


Fig. 3.84: Resistencia residual y de pico (a) Relación entre los esfuerzos, (b) Relación entre los esfuerzos efectivos medios y la deformación volumétrica.

Criterio de rotura:

La relación entre los esfuerzos puede ser descrito por el criterio de rotura que presentó Hobbs (1966) para las rocas.

El nuevo criterio de rotura propuesto por los autores, está representado por las dos

relaciones siguientes (Fig. 3.84):

$$\left(\frac{q}{p'_0}\right) = \alpha \left(\frac{p'}{p'_0}\right)^\beta$$
$$v = C \log_{10} \left(\frac{p'}{p'_0}\right) - v_0$$

Donde:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$$
$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$$

$$p'_0 = 0.1 \text{MPa}$$

Y β , α , C y v_0 son parámetros de resistencia.

Para estos materiales α y β tienen diferentes valores:

- $\alpha_p=1.76$ y $\beta_p=0.38$ (pico)
- $\alpha_r=0.28$ y $\beta_r=0.86$ (residual)

α tiene características similares a la cohesión c' , ya que este puede ser considerado como la resistencia q cuando $p' = p'_0 = 0.1$ MPa. Mientras β se refiere al ángulo de fricción interna ϕ' , el cual varía con la presión de confinamiento. Si $\beta=1$ hay una relación lineal entre q y p' , y el criterio de rotura coincide con el criterio de Mohr-Coulomb.

3.2.5 GRUPO EEUU

3.2.5.1 Año 1993

a. Introducción

Vernik, Bruno y Bovberg (1993) tratan de encontrar una relación entre la porosidad, que predice la resistencia en las rocas sedimentarias, y la resistencia al corte de las rocas siliciclásticas.

Los autores obtienen una fórmula empírica para una clase de areniscas, la cual relaciona las tensiones normal y de corte producidas en el plano de falla, y además incorporan la porosidad como el parámetro textural más informativo de estas rocas.

La porosidad de las muestras ensayadas va desde el 1 al 36% reflejando diferentes grados de diagénesis. El contenido volumétrico de arcillas en las muestras va desde 0 a 56%.

La clasificación de los materiales se llevó a cabo midiendo el volumen de arcilla que contenían las muestras, V_c ; según esto las rocas siliciclásticas se dividen en cuatro grupos principales:

- V_c : <3%, Arenas “limpias”.
- V_c : 3-15%, Arenas.
- V_c : 15-35%, Grauvacas.
- V_c : >35%, Pizarras.

Las dos primeras rocas grano-soportadas mientras que los dos últimos se tratan de matriz soportada de arcilla.

La porosidad en este estudio se trata como un parámetro textural principalmente relacionado con el grado de diagénesis para cada tipo de roca.

b. Ensayos y Resultados

Como puede verse en la Fig. 3.85, existe una diferencia más o menos clara entre rocas grano-soportadas (arenas limpias y arenas) y rocas matriz-soportada. Esto, sin embargo, no ocurre con los grupos de areniscas limpias y areniscas, en los cuales no se ha podido encontrar una diferencia significativa en términos de propiedades de resistencia. Este último grupo muestra una dependencia muy fuerte con la porosidad, la cual puede ser ajustada con la siguiente ecuación (Fig. 3.85):

$$C_0 = C'_0(1 - \gamma\phi)^2 \quad \text{Ec.1}$$

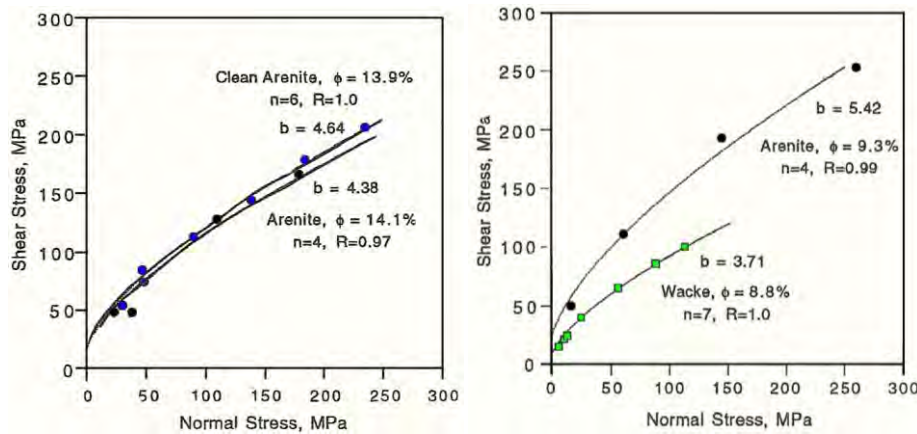


Fig. 3.85: Envolvente típica de Mohr ($\tau = S_0 + b\sigma^n$) para la mayoría de los grupos petrofísicos de siliciclastos con una porosidad comparable. (a) Arenas limpias y Arenas con ϕ (porosidad) $=14\pm0.1\%$ casi superpuestas mostrando valores de b (pendiente) similares. (b) Arenas y Grauvaca (arena sucia) con $\phi = 9\pm0.3\%$ están muy bien diferenciadas, lo cual se refleja en sus valores respectivos de b . Vernik, Bruno y Bovberg (1993).

Donde C'_0 es la resistencia a compresión simple de una roca equivalente con una muy baja porosidad (por ejemplo, granito de grano fino), γ es el parámetro de espacio estructural de poros y ϕ es la porosidad en %.

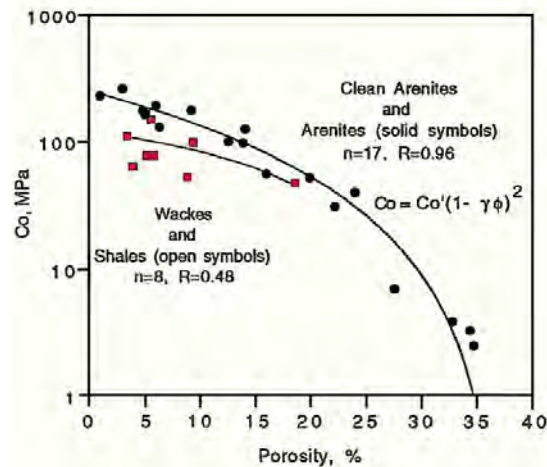


Fig. 3.86: Gráfica semi-logarítmica de la resistencia a la compresión simple versus porosidad para siliciclastos grano soportados y matriz soportados. Notar que para los granos soportados se muestra una relación bastante estrecha del tipo $C_0 = C'_0(1 - \gamma\phi)^2$ con $C'_0 = 254\text{MPa}$ y $\gamma = 0.027$ (ϕ en %). Vernik, Bruno y Bovberg (1993).

Debido a que los grupos de grauvaca y pizarras (matriz soportada) presentan una dispersión alta y no se pueden representar de una forma adecuada, el estudio se centra en las rocas grano-soportadas.

Los autores encontraron que la resistencia al corte o cohesión, S_0 , puede ser

modelada mediante la siguiente expresión:

$$S_0 = \frac{2C_0}{12+k\phi} \quad \text{Ec.2}$$

Donde k es un coeficiente empírico de valor 0.1 si ϕ está en %. Sustituyendo la Ec.1 en la Ec.2 y tomando como datos los que se presentan en la Fig. 3.86 se obtiene:

$$S_0 = \frac{508(1 - 0.027\phi)^2}{12 + 0.1\phi}$$

El siguiente paso fue ajustar en el espacio de Mohr la ecuación 1 dejando fijo el valor de n (desde n=0.6 con incremento de 0.05 en cada paso), después S_0 se calculó a partir de la ecuación 2. El ajuste con el mejor coeficiente de correlación se obtuvo para un valor de n=0.68.

Manteniendo constante el valor de n (0.68) es posible evaluar el parámetro b de resistencia en relación con la porosidad, como se muestra en la Fig. 3.87. La ecuación que mejor se ajusta es:

$$b = 7.63e^{-0.046\phi}$$

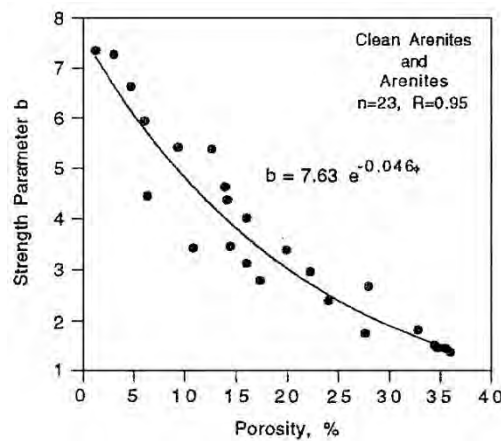


Fig. 3.87: Ajuste del parámetro resistente b vs porosidad para arenas limpias y arenas mediante el método de mínimos cuadrados. Vernik, Bruno y Bovberg (1993).

La nueva expresión de la envolvente de Mohr es:

$$\tau = \frac{508(1-0.027\phi)^2}{12+0.1\phi} + 7.63e^{-0.046\phi}\sigma^{0.68}$$

3.2.6 GRUPO NUEVA ZELANDA

3.2.6.1 Año 1993

a. Introducción

Moon realiza una investigación mediante la cual se establece el rango de variabilidad de las propiedades geotécnicas de las ignimbritas. Para esto se llevan a cabo ensayos de compresión simple (ζ_c), brasileño (ζ_t), y triaxiales (c , ϕ).

Se reconocen dos categorías de ignimbritas en función de los resultados del ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento (“Slake Durability Test, SDT): por un lado se encuentran las ignimbritas de alta durabilidad ($I_{d2} \geq 90\%$), y las que tienen una baja durabilidad ($I_{d2} \geq 30\%$). Las ignimbritas con alta durabilidad se comportan como rocas débiles donde las características del macizo rocoso ejercen gran influencia en la estabilidad de los taludes y su comportamiento ingenieril. Las ignimbritas con baja durabilidad son el material más débil; éstas están clasificadas como rocas blandas, y la característica de la roca intacta es la que influye en su comportamiento.

b. Material de estudio

El material estudiado fue extraído de tres depósitos de ignimbritas:

1. Whakamaru (Fig. 3.88), es un material duro, de color gris, rico en cristales con escasos clastos pumíticos. Hay dos tipos WHAKA/2 que es duro y gris y se encuentra en la base del perfil y WHAKA/1 es blando y rosa, fue extraído del techo del perfil.
2. Ongatiti (Fig. 3.88), es amarilla con abundantes clastos de pumita alargados y cristales. (ONG).
3. Owharoa, color gris pálido, escasos cristales, y abundante lentejones aplanados de pumita oscura la cual le da una estructura fuertemente exfoliada. (OWH).

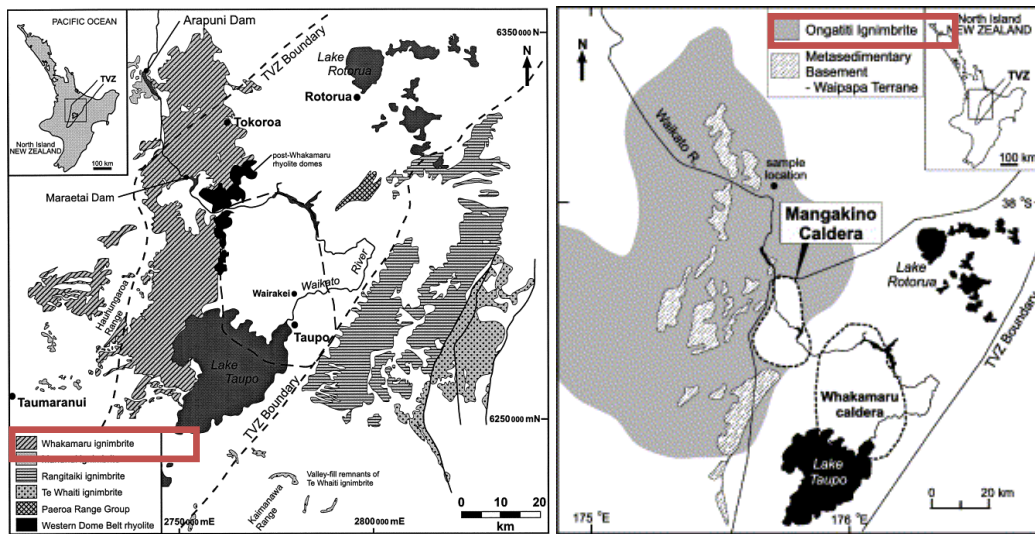


Fig. 3.88: Localización de las ignimbritas Whakamaru y Ongatiti, Nueva Zelanda. (Brown, 1998 y 2004).

Las propiedades de estos materiales se resumen en la siguiente Tabla 3.18.

Tabla 3.18: Propiedades de los diferentes materiales estudiados por Moon, 1993.

MUESTRA	Peso específico		P. Espec. partículas	Porosidad		
	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	ϵ_{efc} (%)	ϵ_{verd} (%)	$\Delta\epsilon$ (%)
WHAKA/1	12.12	16.44	25.20	42	51	18
WHAKA/2	21.24	22.90	26	16.6	18	8
ONG/1	13	17.30	24.90	43	48	10
ONG/2	15.80	19.20	25.40	34	38	11
ONG/3	19.11	21.12	24.70	20	23	13
OWH/1	15.80	18.22	23.80	23.8	34	29
OWH/2	19.28	20.67	23.20	13.9	17	18

c. Ensayos y Resultados.

A la hora de sacar las probetas, el material más débil no pudo ser perforado con máquina, por lo que se usaron muestras cubicas para obtener valores de compresión y de corte.

Las probetas se secaron en estufa, 24h a 105°C.

Los resultados de los ensayos están resumidos en la siguiente Tabla 3.19.

Tabla 3.19: Resultados de los ensayos en las coladas piroclásticas. Moon, 1993.

MUESTRAS		* σ_c (MPa)	* σ_t (MPa)	σ_c/σ_t	*c (MPa)	* ϕ (°)
WHAKA/1	Seca en estufa	0.73				
	Saturada	0.23			0.06	35
	Factor de reblandecimiento	3.2			2.3	
WHAKA/2	Seca en estufa	44	3.1	14.2	13	35
	Saturada	26	1.9	13.7	9	34
	Factor de reblandecimiento	1.7	1.6		1.4	
ONG/1	Seca en estufa	4.7	1.3	3.6	1.6	33
	Saturada	0.8	0.12	6.7	0.19	38
	Factor de reblandecimiento	5.9	10.8		8.4	
ONG/2	Seca en estufa	14	3.4	4.1	7	32
	Saturada	3.5	1	3.5	2.1	31
	Factor de reblandecimiento	4	3.4		3.3	
ONG/3	Seca en estufa	42	4.2	10	7.8	33
	Saturada	19	2.1	9	3.4	33
	Factor de reblandecimiento	2.2	2		2.3	
OWH/1-V	Seca en estufa	26	3.8	6.8	0.8	27
	Saturada	17	2.5	6.8	0.35	33
	Factor de reblandecimiento	1.5	1.5		2.3	
OWH/1-H	Seca en estufa	25	4.4	5.7	0.74	29
	Saturada	12	2.7	4.4	0.42	33
	Factor de reblandecimiento	2	1.6		1.8	
OWH/2-V	Seca en estufa	45	7.1	6.3	1.3	34

MUESTRAS		* σ_c (MPa)	* σ_t (MPa)	σ_c/σ_t	*c (MPa)	* ϕ (°)
Saturada		36	5.4	6.7	1.1	31
Factor de reblandecimiento		1.3	1.3		1.2	
Seca en estufa		54	6.8	7.9	1.4	33
OWH/2-V	Saturada	27	7	3.9	0.8	34
	Factor de reblandecimiento	2	1		1.8	

* σ_c : Compresión simple, σ_t : Resistencia a la tracción, c: Cohesión, ϕ : Ángulo de rozamiento.

Conclusiones de la tabla anterior:

Se observa un alto factor de reblandecimiento (cociente entre la resistencia, a compresión simple o tracción, seca y saturada) en muchos casos. Este valor muestra que muchos de los materiales son extremadamente susceptibles a una pérdida de resistencia cuando se encuentran saturados. Esto es más pronunciado en las ignimbritas de Ongatiti.

Por otro lado, a pesar de la fuerte foliación que presentan en el afloramiento las ignimbritas de Owharoa, no hay una resistencia anisótropa. Por lo tanto, la anisotropía no se cree que sea una característica importante en la resistencia de las ignimbritas.

Naturaleza de la rotura:

Las curvas esfuerzos-deformación muestran todos los componentes de una curva típica descrita por Farmer (1983) y Attewell y Farmer (1976), dicha curva es similar a la de la Fig. 3.89(d).

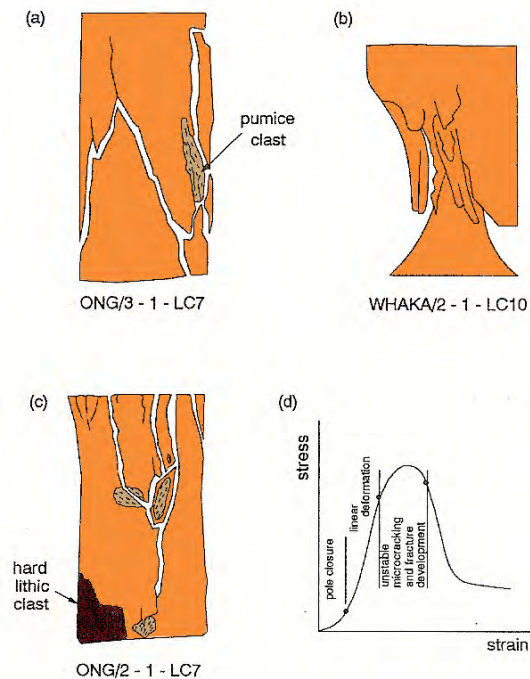


Fig. 3.89: Muestras con fracturas verticales. Estas fracturas se concentraron claramente alrededor y dentro de los clastos pumítico. En la figura (d) se muestra una curva típica de esfuerzo-deformación (después de Farmer, 1983).

Deformaciones iniciales indicadas por una curva cóncava hacia arriba representa deformaciones irreversibles con la clausura de los poros y la compactación de la muestra; una siguiente curva pronunciada y recta indica la deformación elástica que se extiende a aproximadamente el 80% de la resistencia de pico. Más allá de ese punto una curva convexa hacia arriba coincide con la formación de grietas macroscópicas, y las probetas se sometieron a una deformación considerable.

Los cristales y los clastos pumíticos claramente proporcionan zonas de concentración de grietas, ya que representan áreas de contraste de módulo de elasticidad con la masa rocosa, y por lo tanto, son zonas de concentración de esfuerzos (Farmer, 1983); las grietas tenderán a iniciarse en esas áreas y a propagarse fuera de las mismas (Pollard y Aydin, 1988).

Según los autores, la propiedad geotécnica más significativa de las ignimbritas sobre la cual basar la clasificación de estos materiales es el ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento (SDT). La marcada dicotomía permite una subdivisión de los materiales en dos grupos principales: las ignimbritas no duraderas y las duraderas. (Tabla 3.20).

Tabla 3.20: Clasificación geotécnica de las ignimbritas basada en el índice de durabilidad del segundo ciclo del ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento. Las ignimbritas que caen en la categoría de no duraderas se comportan como una roca débil donde las propiedades de la roca intacta controlan el comportamiento ingenieril; las ignimbritas altamente duraderas generalmente tienen extensos sistemas de juntas haciendo que las propiedades del macizo sean de gran importancia. Moon, 1993.

	Non-durable ignimbrites	Highly-durable ignimbrites
slake durability		
I_{dz}	$\leq 30\%$	$\geq 90\%$
density and porosity		
ρ_{dry}	$\leq 1300 \text{ kg m}^{-3}$	$\geq 1500 \text{ kg m}^{-3}$
ρ_{sat}	$\leq 1700 \text{ kg m}^{-3}$	$\geq 1800 \text{ kg m}^{-3}$
η_{eff}	$\geq 40\%$	$\leq 35\%$
η_{true}	$\geq 50\%$	$\leq 40\%$
compressive strength		
$\sigma_{c,dry}$	$\leq 5 \text{ MN m}^{-2}$	$\geq 15 \text{ MN m}^{-2}$
$\sigma_{c,sat}$	$\leq 2.5 \text{ MN m}^{-2}$	$\geq 10 \text{ MN m}^{-2}$
$\sigma_{c,soft}$	> 3	≤ 3
tensile strength		
$\sigma_{t,dry}$		$\geq 3 \text{ MN m}^{-2}$
$\sigma_{t,sat}$		$\geq 1 \text{ MN m}^{-2}$
$\sigma_{t,soft}$		≤ 2
shear strength		
c	$\leq 1 \text{ MN m}^{-2}$	$\geq 6 \text{ MN m}^{-2}$
c'	$\leq 0.1 \text{ MN m}^{-2}$	$\geq 2 \text{ MN m}^{-2}$
c_{soft}	≥ 2	≤ 3
ϕ, ϕ'	$27-38^\circ$	$27-38^\circ$
jointing	non-jointed (spacing $\geq 10 \text{ m}$) blocky or complex	very to extremely wide columnar with variants
engineering problems	sensitive materials, piping, and gully erosion	high cleft water pressures in jointed rock mass

La autora llega a las siguientes conclusiones:

Las ignimbritas se caracterizan por ser rocas débiles bajo todas las formas de esfuerzos, pero la resistencia varía en un amplio rango debido a la génesis del material. Muchas ignimbritas caen en la categoría de rocas blandas (material que muestra propiedades transicionales entre suelo y roca).

El segundo ciclo de SDT muestra una marcada dicotomía, algunas ignimbritas quedan casi intactas, mientras que otras se rompen casi completamente. Esto proporciona una forma rápida de clasificar en ignimbritas no duraderas y duraderas. Esta clasificación proporciona una clara distinción entre aquellas ignimbritas, las cuales responden a los esfuerzos como rocas normales y para las que las juntas, o características del macizo, proporciona el principal control en el comportamiento ingenieril; y las rocas blandas, en las cuales la característica de la roca intacta es lo que más preocupa.

Las ignimbritas duraderas se caracterizan por tener sistemas de juntas abiertas, continuas y verticales. Las no duraderas están sujetas a una rotura rápida de la

estructura cuando están sujetas a cambios en el régimen de humedad o cargas débiles aplicadas. Estas ignimbritas pueden comportarse sensiblemente y ser susceptibles a “gully” en pendientes expuestas o “piping” dentro del material rocoso.

El índice de SDT proporciona el mejor indicador del comportamiento general de las ignimbritas. Sin embargo, algunas ignimbritas que han sufrido caso de rigidización u otros procesos de endurecimiento pueden dar resultados falsos, en estos casos la porosidad efectiva puede ser usada junto con el índice de SDT para clasificar dichos materiales.

3.2.7 GRUPO REINO UNIDO

3.2.7.1 Año 2000

a. Introducción

McDowell (2000) realiza una revisión de la ecuación de trabajo propuesta por McDowell y Bolton (98). Dicha ecuación tiene en cuenta la energía disipada en la rotura de las partículas y en el reordenamiento friccional.

Se adopta un simple enfoque mediante el cual la proporción relativa del trabajo plástico disipado en fractura y fricción es una función de la relación de esfuerzos, y se aplica el principio de normalidad para generar una nueva familia de superficies de fluencia.

b. Desarrollo matemático

La nueva ecuación de trabajo fue propuesta por McDowell y Bolton para explicar la existencia de una línea de compresión normal lineal, cuando el índice de huecos se representa frente al logaritmo de los esfuerzos efectivos para suelos sujetos a una compresión normal unidimensional.

$$q\delta\varepsilon_q + p'\delta\varepsilon_v = Mp'\delta\varepsilon_q + \frac{\Gamma dS}{V_s(1+e)} \quad \text{Ec.1}$$

Donde el primer término de la parte derecha de la ecuación, es debida a la disipación friccional causado por el reordenamiento de las partículas; y el segundo es la energía disipada en la rotura de las partículas, donde Γ (superficie de energía) es la energía disipada en la producción de una unidad de área de superficie y dS es la nueva área de superficie creada en un volumen de suelo de $V_s(1 + e)$ conteniendo un volumen V_s de sólido y un índice de hueco e .

Esta ecuación de trabajo puede aplicarse a arcillas y arenas.

De la Ec.1 es difícil generar una superficie de fluencia debido a la presencia de un nuevo término de rotura. Con el propósito de generar una superficie, es necesario trasladar la energía disipada en rotura a un término que contenga el incremento de deformación plástico. Esto puede hacerse teóricamente si se conocieran las deformaciones resultantes en la rotura de una partícula. El enfoque adoptado mediante el cual la proporción relativa de trabajo plástico disipado en rotura y fricción se toma como una función de la relación de esfuerzos:

$$\frac{\text{Energía disipada en rotura}}{\text{Energía disipada en fricción}} = F(\eta)$$

Así el nuevo término de rotura se puede escribir:

$$\frac{\Gamma dS}{V_s(1+e)} = Mp' \delta \varepsilon_q [F(\eta)]$$

La razón fundamental de este enfoque es que durante compresión plástica isotrópica, la mayoría del trabajo plástico se disipa en rotura, con un pequeño reordenamiento de partículas. En un estado crítico, por lo tanto, todo el trabajo plástico se disipa en la fricción. La Ec.1 se puede describir:

$$q \delta \varepsilon_q + p' \delta \varepsilon_v = Mp' \delta \varepsilon_q [1 + F(\eta)]$$



$$\eta + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_q} = M[1 + F(\eta)]$$

Para el caso isotrópico: $\delta \varepsilon_v / \delta \varepsilon_q = \infty \rightarrow F(\varepsilon) = F(0) = \infty$.

Para el caso de estado crítico: $\varepsilon = M$, $\delta \varepsilon_v / \delta \varepsilon_q = 0 \rightarrow F(\varepsilon) = F(M) = 0$.

La función que satisface los dos casos es:

$$F(\eta) = \frac{M - \eta}{\eta}$$

$$\eta + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_q} = M[1 + F(\eta)] \rightarrow \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_q} = \frac{M^2 - \eta^2}{\eta}$$

La ecuación de trabajo de la Cam-Clay Modificada, quedaría así:

$$q \delta \varepsilon_q + p' \delta \varepsilon_v = \sqrt{(p' \delta \varepsilon_v)^2 + (Mp' \delta \varepsilon_q)^2} + p' q \delta \varepsilon_v \delta \varepsilon_q$$



$$\eta = M \sqrt{2 \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right)}$$

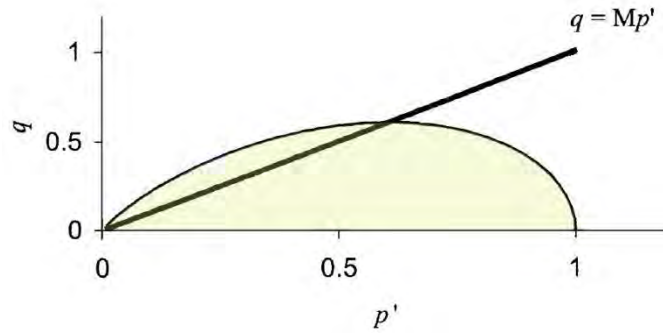


Fig. 3.90: Superficie de fluencia $\eta = M \sqrt{2 \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right)}$. McDowell (2000).

Es fácil ver que si se elige $F(\eta) = \frac{M^2 - \eta^2}{\eta^2}$, se obtendría otra familia de superficies de fluencia:

$$\eta = M \sqrt[3]{3 \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right)}$$

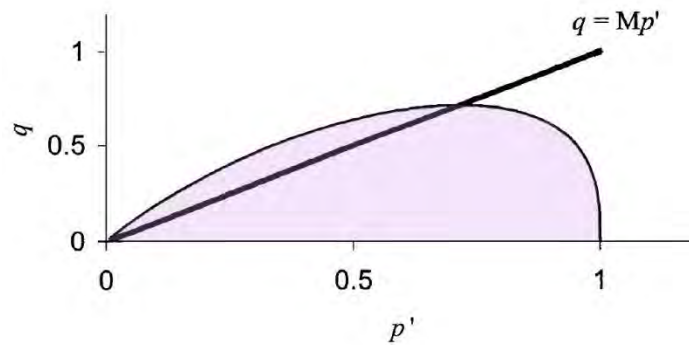


Fig. 3.91: Superficie de fluencia $\eta = M \sqrt[3]{3 \ln \left(\frac{p'_0}{p'} \right)}$. McDowell (2000).

Es fácil ver que con $F(\eta) = \frac{M^a - \eta^a}{\eta^a}$ se puede generar una superficie de fluencia cuya ecuación es:

$$\eta = M \left[(a + 1) \ln \frac{p'_0}{p'} \right]^{1/(a+1)}$$

Con esta ecuación se puede generar una familia de superficies de fluencia para los distintos valores de a (Fig. 3.92).

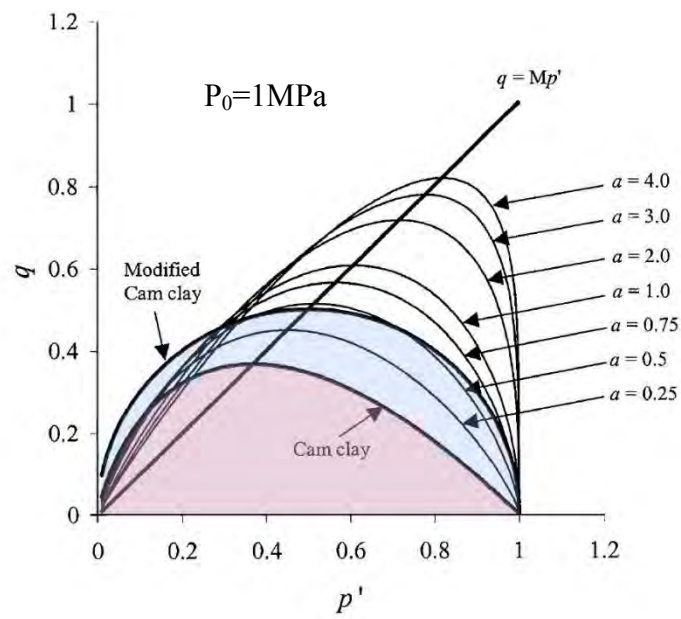


Fig. 3.92: Familia de superficies de fluencia para varios valores de a , $p_0 = 1 \text{ MPa}$. McDowell (2000).

3.3 RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE

A lo largo de este Capítulo se han expuesto los diferentes estudios llevados a cabo en diversos tipos de piroclastos (coladas y oleadas piroclásticas, y piroclastos de caída), y como se pudo observar todos ellos tienen un comportamiento esfuerzo-deformacional similar. Bajo esfuerzos triaxiales, a presiones de confinamiento bajas, el comportamiento de estas rocas volcánicas coincide y es aproximadamente lineal hasta la rotura, la cual ocurre a bajos valores de deformación axial. En este rango la relación esfuerzo-deformación es aproximadamente elástica-lineal. Después del pico, la resistencia decrece significativamente (comportamiento frágil). Se observa que la fragilidad decrece con el aumento de la presión de confinamiento. A altas presiones de confinamiento, el comportamiento es diferente al anterior pero similar en todos los materiales. El material muestra un comportamiento elástico-lineal solo en la primera parte de la curva esfuerzo-deformación, que pasa a continuación a convertirse en un comportamiento elasto-plástico de endurecimiento deformacional.

Se ha visto, además, que las coladas piroclásticas dilatan sólo a bajas presiones de confinamiento y que la razón máxima ocurre después del pico. Esto no se ha podido comprobar en los piroclastos de caída al no haber podido medir con precisión el cambio de volumen.

En cuanto a la compresión simple, en los materiales ensayados se observa una muy buena correlación con la porosidad, tal es el caso para los piroclastos de caída y las tobas Rojas y Amarillas. Asimismo, existe una relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca, que se extiende a la demás rocas volcánicas (Serrano et al., 2007).

La mayoría de los autores llegan a la conclusión de la gran influencia de la estructura de estos materiales en cuanto a su resistencia. Clough et al. (1981), después de unos ensayos en arenas naturales y artificialmente cementadas, concluyen que los enlaces entre partículas inducen un incremento de resistencia debido a un incremento sólo de cohesión. Maccarini (1987) llega a la misma conclusión, pero en este caso con ensayos en suelos artificialmente cementados. Por otra parte, Lade y Overton (1989) observaron que, en arenas densas cementadas artificialmente, el contacto entre las partículas produce un aumento tanto de la cohesión como del ángulo de fricción. Según Lambe (1960), el incremento en el ángulo de fricción es debido a un aumento de la dilatancia relacionada con el tamaño efectivo de las partículas del suelo, que, en arenas cementadas, están compuestas de pequeñas partículas cementadas juntas.

La dispersión de los datos tanto en compresión isótropa como en triaxiales, puede ser atribuida en parte a los diferentes valores de porosidad inicial y en parte a diferentes grados de soldadura (enlace) y a otras características estructurales (Aversa, 1998).

Varios autores dan una relación entre la presión de colapso y la resistencia a compresión simple. Dichas relaciones son:

- Aversa y Evangelista (1993) para las tobas San Rocco y las de Grano Fino obtuvieron una relación igual a $p_c = 1.5\sigma_c - 2\sigma_c$. Y para las tobas Quarto es de $p_c = 1.0\sigma_c$.
- Tommasi y Ribachi (1998), dan una relación para las dos coladas (Amarilla y Roja) pertenecientes a la formación Orvietto de: $p_c = 1.7\sigma_c - 2\sigma_c$.
- Serrano et al (2007) obtuvieron una relación para los piroclastos de caída igual a $p_c = 2.5\sigma_c$.

También es importante resaltar que para algunos autores (Aversa y Evangelista, 1998) la desestructuración de las muestras parece que hace aumentar la presión de colapso.

Diversos autores tales como: Aversa (1998), Serrano (1976, 1997) y Adachi (1981) han desarrollado diferentes ecuaciones para obtener las curvas de fluencia para coladas piroclásticas, piroclastos de caída y oleadas piroclásticas, respectivamente. Pero hasta el momento ninguna de las ecuaciones presenta un buen ajuste.

3.4 TERMINOLOGÍA

ζ_t = Resistencia a la tracción.

ζ_c = Resistencia a compresión simple.

P_c = Resistencia a compresión isótropa.

ζ_0 = Tensión tangencial.

σ_3 = Esfuerzo principal menor.

σ_1 = Esfuerzo principal mayor.

μ = Coeficiente de Poisson.

q_f = Tensión de rotura.

q = Desviador. Parámetros de Cambridge: $q = \sigma_1 - \sigma_3$

p' = Tensiones principales medias. Parámetro de Cambridge: $p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$

γ_s = peso específico de las partículas.

CAPÍTULO 4

MODELOS PROPUESTOS.



ÍNDICE

4.1	INTRODUCCIÓN.....	3
4.2	MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO: CURVAS DE COLAPSO TEÓRICAS	4
4.2.1	FUNDAMENTOS.....	4
4.2.1.1	Conceptos básicos.....	4
4.2.1.2	Ley de consumo de energía en los piroclastos.....	9
4.2.1.3	Dilatancia.....	11
4.2.2	CURVAS DE COLAPSO.....	15
4.2.2.1	Curvas aditivas.....	15
4.2.2.2	Curvas multiplicativas.....	19
4.2.2.3	Curvas asociadas.....	24
4.2.3	RESUMEN.....	28
4.2.3.1	Sobre los fundamentos.....	28
4.2.3.2	Curvas de colapso. Dilatancia no asociada aditiva.....	29
4.2.3.3	Curvas de colapso dilatancia no asociada multiplicativa.....	29
4.2.3.4	Curvas de colapso asociadas.....	30
4.3	MODELO EMPÍRICO: AJUSTE EMPÍRICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	31
4.3.1	CRITERIOS DE ROTURA UNIFICADOS.....	31
4.3.1.1	Variables.....	31
4.3.1.2	Familias de curvas de colapso unificadas.....	32
4.3.1.3	Ángulo de rozamiento instantáneo y máximo de la curva de colapso	33
4.3.1.4	Aspecto de la familia E (Fig. 4.10).....	36
4.3.1.5	Aspecto de la familia P (Fig. 4.11).....	36
4.3.1.6	Criterio Parabólico Colapsable (2D). Variables de Hill.....	37
4.3.2	DETERMINACION DE PARÁMETROS.....	43
4.3.2.1	Procedimiento general.....	43
4.3.2.2	Cálculo de los valores β , t , λ iniciales (Caso E).....	45
4.3.2.3	Cálculo de los valores iniciales M , t , λ (Caso P).....	48

4.3.3	AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS	51
4.3.3.1	Resistencia teórica en ensayos con presión isotropa (Fig. 4.19).....	51
4.3.3.2	Error cuadrático	52
4.3.3.3	Minimizar el error	53
4.4	OTROS: CARGA ISÓTROPICA DE COLAPSO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS EN FUNCIÓN DE LA MACROPOROSIDAD	54
4.4.2	MACROESTRUCTURA DE POROS.....	54
4.4.3	CARGA ISÓTROPICA DE COLAPSO.....	55
4.4.3.1	Rocas con estructura de poros reticular	55
4.4.3.2	Rocas con estructuras de poros vacuolares.....	59
4.4.3.3	Conclusión práctica.....	61

4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se proponen una serie de modelos de comportamiento de estos materiales, basados en diferentes principios. En el capítulo 5 se realiza el estudio del ajuste del comportamiento empírico de los materiales a los modelos propuestos en este capítulo, y se deduce cuál es el modelo de comportamiento que se ajusta mejor a los resultados empíricos de los que se dispone.

Los modelos propuestos son los siguientes:

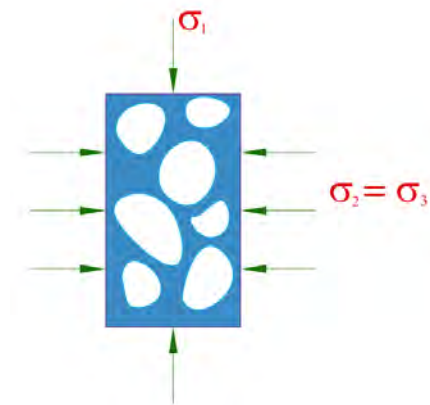
1. En primer lugar se propones un modelo teórico de comportamiento basado en el consumo energético de estos materiales durante la rotura, de forma análoga a las propuestas anteriores realizadas por Serrano (1976, 1997) y Serrano et al (2002b). El modelo propuesto supone un avance en la termodinámica de la rotura frente a los modelos anteriores de Serrano.
2. En segundo lugar se proponen unos modelos o criterios de rotura unificados, que en cierto modo suponen una extensión generalizada de los modelos de rotura de Coulomb (criterio Parabólico Colapsable) y de Hoek y Brown (criterio Elíptico Colapsable).
3. Por último, se propone un modelo de ajuste para la obtención de la carga isotropa de colapso en función de la densidad seca de estos materiales. El modelo se deduce en primer lugar de forma teórica, considerando la macro-estructura de poros de los materiales, y a continuación se ajusta a los resultados empíricos para obtener el ajuste de los parámetros que intervienen en el mismo.

4.2 MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO: CURVAS DE COLAPSO TEÓRICAS

4.2.1 FUNDAMENTOS

4.2.1.1 Conceptos básicos

4.2.1.1.1 Variables de Cambridge



a) Variables de tensión.

- Reales (Fig. 4.1):

$$p^* = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad q^* = \sigma_1 - \sigma_3$$

- Trasladas o canónicas:

$$p_0 = t + p$$

En donde t es la resistencia a la tracción isótropa.

Fig. 4.1: Tensiones sobre una probeta.

- Oblicuidad de la tensión (Fig. 4.2):

$$\eta = \frac{q}{p}$$

- Oblicuidad canónica (Fig. 4.2):

$$\eta_0 = \frac{q}{p_0}$$

- Tensiones adimensionales:

$$p = \frac{p}{\beta} \quad q = \frac{q}{\beta}$$

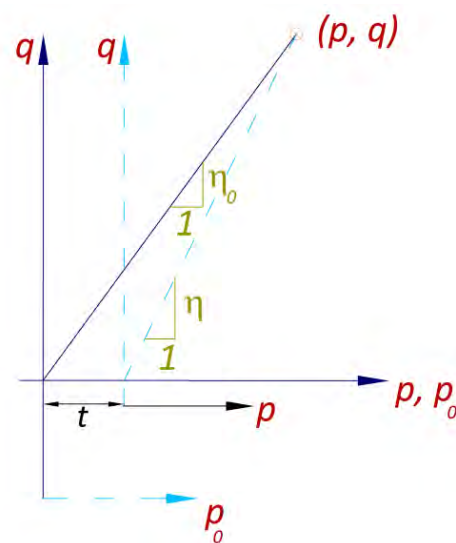


Fig. 4.2: Oblicuidad de las tensiones y oblicuidad canónica.

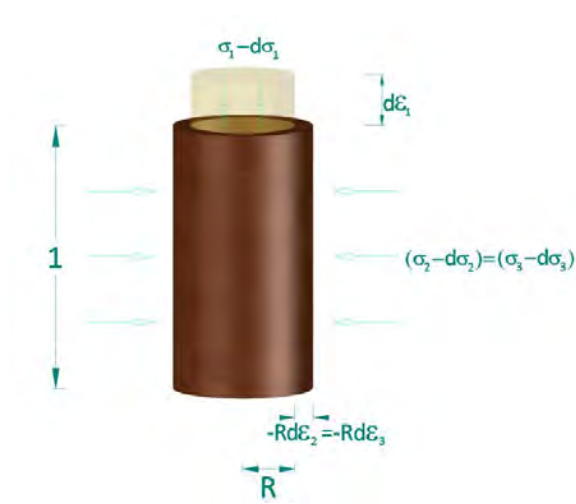


Fig. 4.3: Variables de deformación.

Donde β es un módulo de presión. (El asterisco (*) significa variable dimensional).

b) Variables de deformación (Fig. 4.3).

En los estudios teóricos de consumo de energía sólo intervienen los incrementos de deformación $d\epsilon_1$ $d\epsilon_2$ $d\epsilon_3$ que se producen al incrementar las cargas σ_1 σ_2 σ_3 en unos incrementos $d\sigma_1$ $d\sigma_2$ $d\sigma_3$ respectivamente.

Incrementos de deformación total:

$$dv = d\epsilon_1 + 2d\epsilon_3 \quad \text{Variación de volumen.}$$

$$d\gamma = \frac{2}{3}(d\epsilon_1 - d\epsilon_3) \quad \text{Variación de deformación de corte.}$$

Componentes:

Las deformaciones tiene dos componentes: la reversible o elástica, y la irreversible llamada también plástica o de rotura. En los materiales muy rígidos con un elevado módulo de elasticidad la deformación elástica puede considerarse despreciable frente a la rotura.

$$dv = dv^e + dv^p \quad d\gamma = d\gamma^e + d\gamma^p$$

En todos los estudios teóricos de consumo de energía es fundamental el concepto de razón de dilatancia o dilatancia:

$$\frac{dv}{d\gamma}$$

Razón de Dilatancia plástica, ψ

$$\psi = \frac{dv^p}{d\gamma^p}$$

4.2.1.1.2 Caracterización del medio piroclástico

Las características fundamentales que intervienen en los estudios teóricos son:

- Resistencia a la tracción isotropa, t
- Ángulo de rozamiento instantáneo, ρ
- Razón de Dilatancia plástica ψ

Más adelante aparecerán otros parámetros ligados a los anteriores que se definirán en su momento.

- a) Resistencia a la tracción t .

La resistencia a la tracción t es pequeña, en muchos casos despreciables Serrano, Olalla y Perucho han tratado este tema.

- b) Rozamiento instantáneo ρ (Fig. 4.4).

- En deformación plana:

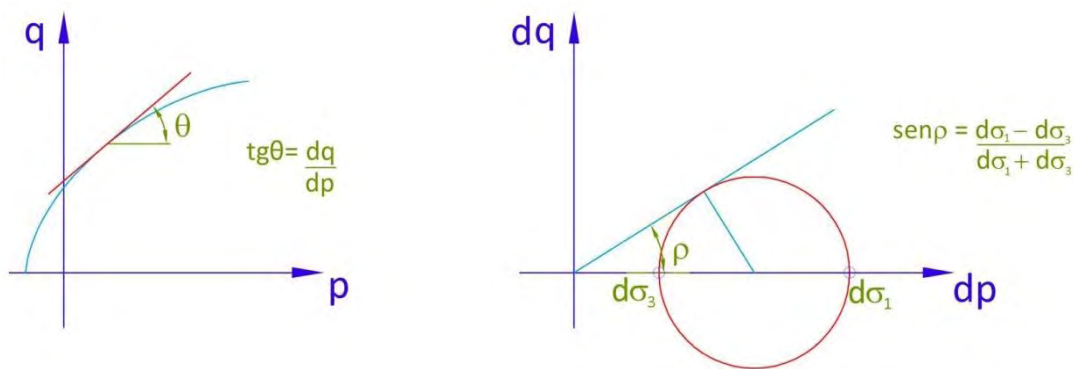


Fig. 4.4: Ángulo de rozamiento instantáneo.

Tensiones p y q en variables de Hill!

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\sin \rho = \frac{d\sigma_1 - d\sigma_3}{d\sigma_1 + d\sigma_3} = \frac{dq}{dp} = \tan \theta$$

$$\frac{dq}{dp} = \sin \rho$$

- En deformación triaxial:

Ahora en variables de Cambridge:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\frac{dq}{dp} = \frac{d\sigma_1 - d\sigma_3}{\frac{d\sigma_1 + 2d\sigma_3}{3}} = 3 \frac{d\sigma_1 - d\sigma_3}{d\sigma_1 + 2d\sigma_3} = 3 \frac{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} - 1}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 2}$$

Se ha visto anteriormente que:

$$\sin \rho = \frac{d\sigma_1 - d\sigma_3}{d\sigma_1 + d\sigma_3} = \frac{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} - 1}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 1}$$

Luego:

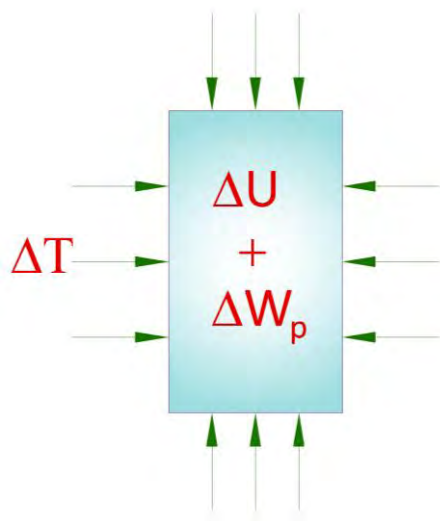
$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}$$

Por lo tanto:

$$\frac{dq}{dp} = 3 \frac{\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} - 1}{\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} + 2} = \frac{6 \sin \rho}{3 - \sin \rho}$$

$$q' = \frac{dq}{dp} = \frac{6 \sin \rho}{3 - \sin \rho}$$

4.2.1.1.3 Termodinámica de la rotura



a) Una forma del primer principio de la termodinámica (Fig. 4.5):

A una probeta en un ensayo triaxial se le suministra un trabajo externo $\Delta T = \sum \sigma_i d\epsilon_i$

Dentro de la probeta el trabajo externo ΔT es utilizado en un aumento de la energía interna ΔU (energía elástica) y un consumo de energía ΔW_p dedicado a la rotura (No se consideran los aspectos térmicos).

Fig. 4.5: Termodinámica de la rotura.

$$\Delta T = \Delta U + \Delta W_p$$

b) Componentes del trabajo externo.

El trabajo externo ΔT tiene dos componentes, una elástica (ΔT_E) y otra plástica (ΔT_p):

$$\Delta T = \Delta T_E + \Delta T_p$$

Siendo:

$$\Delta T_E = \sum \sigma_i d\varepsilon_i^E$$

$$\Delta T_p = \sum \sigma_i d\varepsilon_i^p$$

Se demuestra que:

$$\Delta T_p = \sum \sigma_i d\varepsilon_i = p dv + q d\gamma$$

Y análogamente:

$$\Delta T = p dv^p + q d\gamma^p$$

c) Consecuencias del primer principio.

La componente ΔT_p del trabajo externo que produce las deformaciones $d\varepsilon_i^p$ de rotura es igual al consumo de energía por rotura ΔW_p en el interior de la probeta.

$$\Delta T_p = \Delta W_p$$

Luego

$$p dv^p + q d\gamma^p = \Delta W_p$$

Que se puede escribir:

$$\Delta T_p = p dv^p + q d\gamma^p = (\psi + \eta) p d\gamma^p = \Delta W_p$$

siendo $\psi = \frac{dv^p}{d\gamma^p}$, y $\eta = \frac{q}{p}$

d) Consumo de energía en la rotura.

ΔW_p es una cierta función F:

$$\Delta W_p = F(p, q, dv^p, d\gamma^p)$$

Que se puede poner en la forma:

$$\Delta W_p = pd\gamma^p, F^*(\psi, \eta)$$

e) Expresión general de la ley de consumo energética.

$$\Delta W_p = \Delta T_p$$

Que según todo lo anterior:

$$\psi + \eta = F^*(\psi, \eta)$$

4.2.1.2 *Ley de consumo de energía en los piroclastos*

4.2.1.2.1 **Ley de Roscoe y Burland (1968)**

Roscoe y Bourland propusieron:

$$F^* = \sqrt{\psi^2 + \mu^2}$$

Donde μ es un parámetro friccional propio de cada material, y como tal parámetro una constante del material.

La ley de consumo quedaría:

$$\psi + \eta = \sqrt{\psi^2 + M^2}$$

Luego:

$$\eta^2 + 2\eta\psi = M^2$$

4.2.1.2.2 **Ley propuesta para los piroclastos**

a) Trabajo externo ΔT_p

El aporte de trabajo externo plástico ΔT_p se puede expresar en la forma:

$$\begin{aligned}\Delta T_p &= p dv^p + q d\gamma^p = p_0 dv^p + q d\gamma^p - t dv^p = \left[\frac{dv^p}{d\gamma^p} + \frac{q}{p_0} - \frac{t}{p_0} \frac{dv^p}{d\gamma^p} \right] p_0 d\gamma^p \\ &= \left(\psi + \eta_0 - \frac{t}{p_0} \psi \right) p_0 d\gamma^p\end{aligned}$$

La tasa cuadrática de trabajo externo plástico (TCTEP) es:

$$\left(\frac{\Delta T_p}{p_0 d\gamma^p} \right)^2 = (\psi + \eta_0)^2 + K_E$$

La TCTEP tiene dos componentes $(\psi + \eta_0)^2$ y K_E . La componente $(\psi + \eta_0)^2$ está dedicada a suministrar trabajo para vencer la dilatación y la fricción. La componente K_E está relacionada con el trabajo necesario para romper la cohesión. A diferencia de $(\psi + \eta_0)^2$ que siempre es positiva, K_E puede ser tanto positiva como negativa; este último caso significa que en la rotura se libera energía que debe ser absorbida por el resto del sistema.

$$K_E = \left(\psi \frac{t}{p_0} \right)^2 - 2\psi \frac{t}{p_0} (\psi + \eta_0)$$

- $K_E=0$ para $t = 0$, como debe ser en medios incoherentes.
- $K_E>0$ para $\psi<0$, (cuando hay incremento de volumen en la rotura), ya que siempre $\psi+\eta_0>0$.
- $K_E<0$ para $\psi>0$, (cuando hay reducción de volumen, como es el caso del colapso en las cercanías de p_c).
- $K_E= 0$ para $\psi=0$.

b) Consumo de energía en la rotura ΔW_p .

Para la función de consumo de energía en la rotura se propone:

$$\Delta W_p = p_0 d\gamma_p F^*(\psi, \eta_0)$$

Con la función $F^*(\psi, \eta_0)$ del tipo:

$$F^*(\psi, \eta_0) = \sqrt{\psi^2 + M_F^2 \varphi + K_I}$$

c) Análisis de los componentes de F^* .

- ψ^2 es una tasa cuadrática de consumo ligada a la dilatación.
- $M_F^2 \varphi$ está relacionada con la fricción M_F es una constante del material y φ es una función siempre positiva y monótona decreciente con la presión p_0 .

Por convención se toma:

$$\varphi = \varphi\left(\frac{p}{p_c}\right) \text{ y } \varphi(1) = 1$$

La función $\varphi\left(\frac{p}{p_c}\right)$ está ligada a la variación del ángulo de rozamiento instantáneo ρ .

- K_I es una tasa cuadrática ligada a la rotura de la cohesión. En principio se tomará que $K_I = K_E$

d) Ley de consumo resultante.

$$\left(\frac{\Delta T_p}{p_0 d\gamma^p}\right)^2 = \left(\frac{\Delta W_p}{p_0 d\gamma_p}\right)^2$$

$$(\psi + \eta_0)^2 + K_E = \psi^2 + M_F^2 \varphi + K_I$$

De donde resulta la ley:

$$\eta_0^2 + 2\eta_0\psi = M_F^2 \varphi$$

que modifica a la ley de consumo de Roscoe y Burland, adaptándola para los piroclastos coherentes e incoherentes con rozamiento instantáneo ρ , el cual puede ser constante o decreciente con la presión.

4.2.1.3 Dilatancia

4.2.1.3.1 Postulado de Drucker

Drucker (1959) estableció el postulado de estabilidad local que se expone a continuación,

$$dp dv^p + dq d\gamma^p \geq 0$$

que dividiendo por $dp d\gamma^p$ (cantidad positiva) resulta:

$$\frac{dq}{dp} + \frac{dv^p}{d\gamma^p} \geq 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{dq}{dp} + \psi \geq 0$$

La condición de igualdad lleva a: $\psi = -\frac{dq}{dp}$

que es lo que se ha llamado dilatancia asociada, hipótesis muy usada en la teoría de plasticidad.

4.2.1.3.2 Dilatancia no asociada

Suponiendo para estos materiales una ley de dilatación no asociada, se van a adoptar dos enfoques diferentes:

a) Enfoque aditivo.

La estabilidad local se puede conseguir, Wong y Mitchell (1975), con la condición de Drucker puesta en la forma:

$$dp dv^p + dq d\gamma^p = a \geq 0$$

que se puede escribir en la forma:

$$\frac{dq}{dp} + \psi = \alpha_A$$

$$\text{Con } \alpha_A = \frac{a}{dp dv^p} \geq 0$$

Esto lleva a

$$\psi = -\frac{dq}{dp} + \alpha_A$$

que permite eliminar a la dilatación en la ecuación de consumo, que queda así:

$$\eta_0^2 + 2\alpha_A \eta_0 - 2\eta_0 q' = M_F^2 \varphi$$

$$\text{Con } q' = \frac{dq}{dp}$$

b) Enfoque multiplicativo.

La condición de estabilidad puede conseguirse con el postulado en la forma:

$$\alpha_\mu \frac{dq}{dp} + \psi = 0$$

$$\text{de donde } \psi = -\alpha_M \frac{dq}{dp}$$

El postulado de Drucker establece que:

$$\frac{dq}{dp} + \psi = (1 - \alpha_M) \frac{dq}{dp} = \alpha_A \geq 0$$

Una forma sencilla de que se verifique el postulado de Drucker es definir α_M por la relación:

$$\alpha_M = 1 - k(z_0)q'$$

siendo $z_0 = \frac{p_0}{p_{c0}}$, con la condición que $k(z_0) \geq 0$.

Resulta así que: $\frac{dq}{dp} + \psi = k(z_0)[q']^2$, que es siempre positiva.

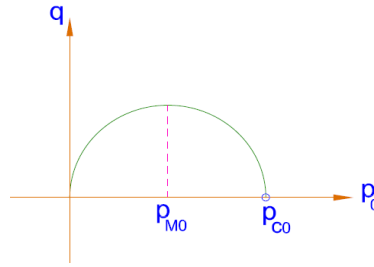
Otra forma de definir α_M es la siguiente:

La condición $(1 - \alpha_M)q' \geq 0$ indica que $(1 - \alpha_M)$ debe siempre tener el mismo signo que q' .

Las curvas de colapso tienen un valor máximo (q_M, p_{M0}) que se produce cuando $q'=0$.

Para $p_0 < p_{M0}$, $q' > 0$

Para $p_0 > p_{M0}$, $q' < 0$



Luego q' tiene el mismo signo que $p_{M0} - p_0$ y, por tanto, $(1 - \alpha_M)$ debe tener el mismo signo que $(p_{M0} - p_0)$.

La función α_M ha de ser de la forma adimensional unitaria:

$$\alpha_M = 1 - (z_{M0} - z_0)k(z_0)$$

Siendo $z_0 = \frac{p_0}{p_{c0}}$ y $k(z_0)$ igual a una función siempre positiva.

El postulado de Drucker es ahora:

$$\frac{dq}{dp} + \psi = (1 - \alpha_M)q' = ck(z_0) \geq 0$$

ya que $(z_{M0} - z_0)q'$ es siempre positivo.

Las dos relaciones propuestas para α_M son muy útiles para encontrar leyes de fluencia que hagan compatible las leyes empíricas de rotura con los postulados

termodinámicos.

La ecuación de consumo junto con la nueva expresión de la dilatancia:

$$\psi = -\alpha_M q'$$

Da la ecuación diferencial de la curva de colapso

$$\eta_0^2 - 2\alpha_M \eta_0 q' = M_F^2 \varphi(z)$$

El máximo se produce para $q'=0$, luego:

$$\eta_{M0} = \mu_F \sqrt{\varphi(z_M)_0}$$

La curva de colapso puede ponerse en la forma:

$$\eta_0 = F(z)$$

Luego

$$F(z_M) = M_F \sqrt{\varphi(z_M)}$$

Ecuación que permite encontrar z_M en función de M_F

4.2.2 CURVAS DE COLAPSO

4.2.2.1 Curvas aditivas

4.2.2.1.1 Ecuación diferencial general

Ecuación de consumo:

$$\eta_0^2 + 2\eta_0\psi = M^2\varphi \quad \text{con } \varphi > 0$$

Se adopta una dilatancia igual a:

$$\psi = \alpha_A - q'$$

Ecuación diferencial en q' :

$$\eta_0^2 + 2\alpha_A\eta_0 - 2\eta_0q' = M_F^2\varphi$$

Ecuación diferencial en η_0'

$$q = \eta_0 p_0 \quad \Rightarrow \quad q' = \eta_0' p_0 + \eta_0$$
$$-\eta_0^2 + 2\alpha_A\eta_0 - 2\eta_0\eta_0' p_0 = M_F^2\varphi$$

4.2.2.1.2 Casos particulares. Dilatancia asociada

Dilatancia asociada.

$$\alpha_A = 0 \quad -[\eta_0^2 + (\eta_0^2)' p_0] = M_F^2\varphi$$

Si la fricción es constante $\varphi=1$

$$-[\eta_0^2 + (\eta_0^2)' p_0] = M_F^2$$

Este caso será estudiado en el apartado 4.2.2.3 Curvas asociadas en las que coinciden los dos enfoques aditivos y multiplicativos.

4.2.2.1.3 Integración

Para facilitar la integración se supondrá que tanto α como φ son constantes ($\varphi=1$), $M_F=M$ y $\alpha_A = a$.

Ver Serrano (1973), Serrano (1996). Serrano et al. (2002).

Ecuación diferencial simplificada:

$$-\eta_0^2 + 2a\eta_0 - 2\eta_0\eta_0' p_0 = M_F^2 \quad \text{Siendo } a=\alpha_A=\text{constante y } \varphi=1$$

$$-[(\eta_0 - a)^2 + 2\eta_0\eta_0' p_0] = M_F^2 - a^2 = s^2$$

$$M_F^2 - a^2 = s^2$$

Cambio de variable:

$$\eta_0 - a = sx$$

$$\eta'_0 = sx'$$

$$-2\eta_0\eta'_0p_0 = s^2 + (\eta_0 - a)^2$$

Resuelta:

$$-s \frac{dp_0}{p_0} = \left[s \frac{2x}{1+x^2} + \frac{2a}{1+x^2} \right] dx$$

$$-s \ln p_0 + K_1 = s \ln(1+x^2) + 2a \tan^{-1}(x)$$

$$-\ln p_0 + K = \ln(1+x^2) + \frac{2a}{s} \arctan(x)$$

$$K \frac{p_{c0}}{p_0} = (1+x^2) \exp \left[\frac{2a}{s} \arctan x \right]$$

Deshaciendo el cambio

$$K \frac{p_{c0}}{p_0} = \frac{M_F^2 + \eta_0^2 - 2a\eta_0}{M_F^2 - a^2} \exp \left[\frac{2a}{s} \arctan \frac{\eta_0 - a}{s} \right]$$

Determinación de la constante:

Para $\eta_0 = 0 \Rightarrow p_0 = p_{c0}$

Resulta:

$$\frac{p_{c0}}{p_0} = \left[\frac{M_F^2 + \eta_0^2 - 2a\eta_0}{M_F^2} \right] \frac{\exp \left[\frac{2a}{s} \arctan \frac{\eta_0 - a}{s} \right]}{\exp \left[\frac{2a}{s} \arctan \frac{-a}{s} \right]}$$



$$\frac{p_{c0}}{p_0} = \frac{M_F^2 + \eta_0^2 - 2a\eta_0}{M_F^2} \exp \left[\frac{2a}{s} \arctan \left(\frac{\eta_0 s}{M^2 - a\eta_0} \right) \right]$$

Ecuación 1: Ecuación de la curva de colapso para dilatación no asociada en el caso aditivo.

La pendiente viene dada por:

$$q' = \frac{\eta_0^2 + 2a\eta_0 - M_F^2}{2\eta_0}$$

La pendiente q' es ∞ para $\eta_0 = 0$ y $\eta_0 = \infty$.

El máximo se produce para $q' = 0$.

$$\eta_0^2 + 2a\eta_0 = M_F^2 \quad \eta_{0\mu} = \sqrt{M^2 + a^2} - a = b - a \quad \text{con } b = \sqrt{M^2 + a^2}$$

El máximo es:

$$\frac{p_{M0}}{p_{c0}} = \frac{1}{2} \left[\frac{M_F}{b-a} \right]^2 \frac{1}{\text{Exp} \left[\frac{2a}{s} \arctan \frac{s}{b} \right]} = m_p(a)$$

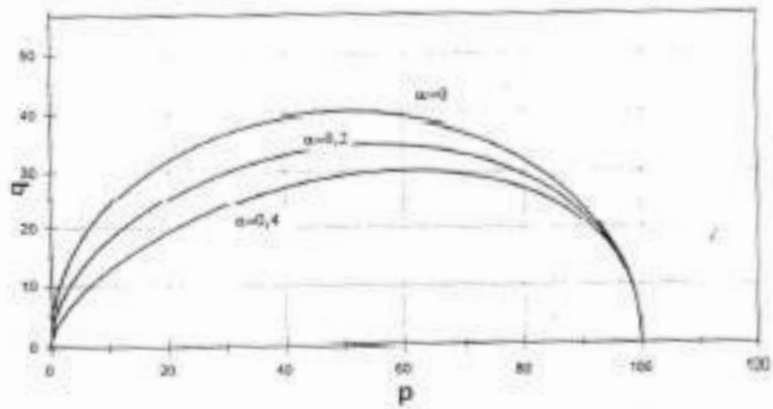
$$\frac{q_M}{p_{c0}} = \eta_{M0} \left(\frac{p_{M0}}{p_{c0}} \right) = \frac{1}{2} \frac{M_F^2}{b-a} \frac{1}{\text{Exp} \left[\frac{2a}{s} \arctan \frac{s}{b} \right]} = m_q(a)$$

Estas son, además, las ecuaciones paramétricas de las trayectorias de los máximos al variar a .

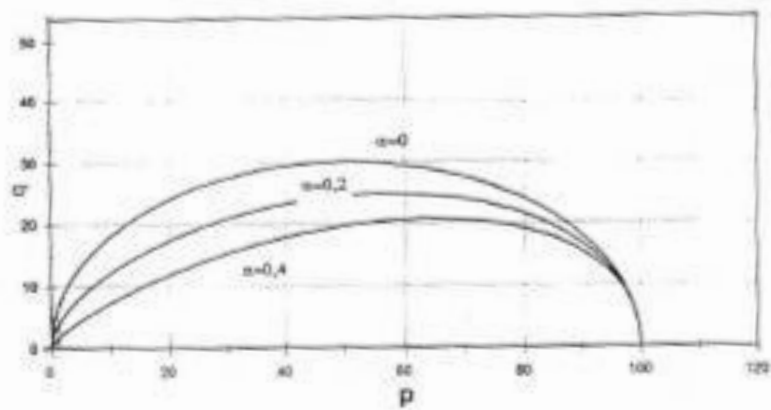
$\left. \begin{array}{ll} \alpha = \tan^{-1} \frac{\eta_0 - a}{s} & \tan \alpha = \frac{\eta_0 - a}{s} \\ \beta = \tan^{-1} \frac{-a}{s} & \tan \beta = \frac{-a}{s} \end{array} \right\}$	$\tan(\alpha - \beta) = \frac{\frac{\eta_0 - a}{s} - \left(\frac{-a}{s} \right)}{1 + \left(\frac{\eta_0 - a}{s} \right) \left(\frac{-a}{s} \right)} = \frac{\eta s}{s^2 - a\eta_0 + a^2} = \frac{\eta_0 s}{\mu^2 - a\eta_0}$
--	---

LINEAS DE COLAPSO

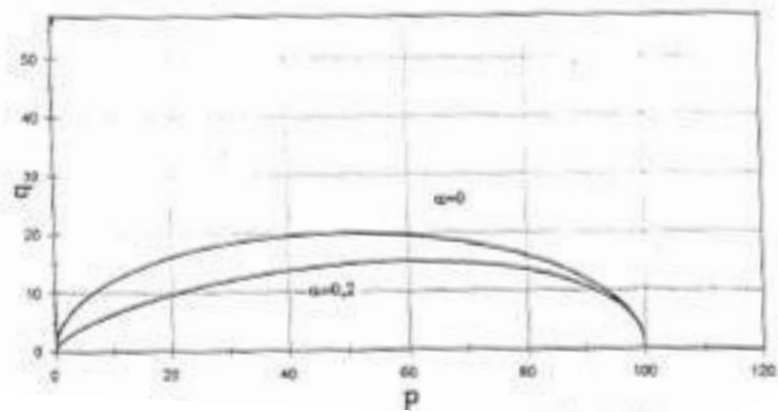
$M=0,8$



$M=0.6$



$M=0,4$



4.2.2.2 Curvas multiplicativas

Aunque tiene muy poco interés práctico, ya que en muy raras ocasiones se parte de las leyes de fluencia para determinar las curvas de colapso, por afán de completar se expone a continuación el tratamiento teórico de este caso.

4.2.2.2.1 Ecuación diferencial

Ecuación de consumo:

$$\eta_0^2 + 2\eta_0\psi = M^2\varphi \quad \text{con } \varphi > 0$$

En este caso se adopta un valor de dilatancia igual a:

$$\psi = -M_\mu q' \quad \text{con } \alpha_M = 1 - K(z_{M0} - 1)\alpha(z_0), \text{ como se vio anteriormente.}$$

Ecuación diferencial en q'

$$\eta_0^2 - 2\alpha_M\eta_0q' = M^2\varphi$$

Ecuación diferencial en η'_0

$$(1 - 2\alpha_M)\eta_0^2 - 2\alpha_M\eta_0\eta'_0p_0 = M^2\varphi$$

Casos particulares:

- Dilatancia asociada:

$$K=0, \alpha_M=1 \quad \longrightarrow \quad -[\eta_0^2 + (\eta_0^2)'p_0] = M^2\varphi$$

Si la fricción es constante $\varphi=1$:

$$-[\eta_0^2 + (\eta_0^2)'] = M^2$$

Este caso será estudiado en el capítulo 2.3.

4.2.2.2.2 Integración general

Se va a trabajar con variables adimensionales:

$$p^* = \frac{p}{p_{co}} \quad q^* = \frac{q}{p_{co}} \quad p_0^* = \frac{p_0}{p_{co}}$$

Por facilidad de escritura llamamos:

$$z_0 = \frac{p_0}{p_{co}} = p_0^* \quad 0 \leq z_0 \leq 1$$

La ecuación diferencial no cambia debido a que q' es igual a:

$$q' = \frac{dq}{dp} = \frac{dq^*}{dp_0^*} = \frac{dq^*}{dz} = q^{*'}$$

$$\eta_0^2 - 2\alpha_M \eta_0 q^{*'} = M_F^2 \varphi$$

Como $q^* = \eta_0 z_0$

$$(1 - 2\alpha_M)\eta_0^2 - 2\alpha_M \eta_0 \eta_0' z_0 = M^2 \varphi$$

$$\boxed{\lambda \eta_0^2 - (\eta_0^2)' z_0 = M^2 \frac{\varphi}{\alpha_\mu}} \quad \text{con } \lambda = \frac{1-2\alpha_M}{\alpha_M}$$

Se toma $\eta_0^2 = uv$

$$(\eta_0^2)' = vu' + v'u$$

$$v(\lambda u - u' z_0) - (u z_0) v' = \mu^2 \frac{\varphi}{\alpha_M}$$

Haciendo $\lambda u - u' z_0 = 0$

$$\text{Resulta } (u z_0) v' = M^2 \frac{\varphi}{\alpha_M}$$

Ecuaciones que permiten determinar u y luego v.

$$\frac{du}{u} = \lambda \frac{dz_0}{z_0}$$

$$\ln u = \int_0^{z_0} \frac{\lambda}{z_0} dz_0 + \ln K_1$$

$$u = K_1 \text{Exp} \left[\int_0^{z_0} \frac{\lambda}{z_0} dz_0 \right] = K_1 \theta_1(z_0)$$

$$v' = -M_F \frac{\varphi}{\alpha_M u z_0}$$



$$v' = -\frac{M_F^2}{K_1} \frac{\varphi}{\alpha_M z_0 \theta_1(z_0)}$$

$$v = -\frac{M_F^2}{K_1} \int_0^{z_0} \frac{\varphi dz_0}{\alpha_M z_0 \theta_1} + K_2 = -\frac{M_F^2}{K_1} [\theta_2(z_0) + K]$$

Luego $\eta_0^2 = uv$

$$\eta_0^2 = -M_F^2 \theta_1(z_0) [\theta_2(z_0) + K]$$

K se determina sabiendo que para $z_0=1$ y $\eta_0=0$

$$\eta_0^2 = -M_F^2 \theta_1(z_0) [\theta_2(1) + \theta_2(z_0)]$$

4.2.2.2.3 Casos particulares

a) Caso $\alpha_M = 1 - K(z_{M0} - z_0)$, $1 - Kz_{M0} > 0$, $\varphi = \varphi(z_0)$

Se tiene que:

$$\theta_1(z_0) = \text{Exp} \left[\int_0^{z_0} \frac{\lambda}{z_0} dz_0 \right]$$

$$\lambda = \frac{1 - 2\alpha_M}{\alpha_M} = \frac{1}{\alpha_M} - 2 = \frac{1}{1 - K(z_{M0} - z_0)} - 2$$

$$\frac{\lambda}{z_0} = \frac{1}{z_0[1 - K(z_{M0} - z_0)]} - \frac{2}{z_0} = \frac{1}{1 - Kz_{M0}} \left[\frac{1}{z} - \frac{K}{1 - K(z_{M0} - z_0)} \right] - \frac{2}{z_0}$$

Llamando a:

$$\frac{1}{1 - Kz_{M0}} = A$$

Resulta,

$$\int_0^{z_0} \frac{\lambda}{z_0} dz_0 = \ln \left(z_0^{-2} \left[\frac{z_0}{1 - K(z_{M0} - z_0)} \right]^A \right) + \ln$$

Y por lo tanto,

$$\theta_1 = z_0^{-2} \left[\frac{z_0}{1 - K(z_{M0} - z_0)} \right]^A$$

Se tiene que,

$$\theta_2 = \int_0^{z_0} \frac{\varphi dz_0}{\alpha_M z_0 \theta_1} = \int_0^{z_0} \varphi \left[\frac{1 - K(z_{M0} - z_0)}{z_0} \right]^{A-1} dz_0$$

Luego,

$$\eta_0^2 = M_F^2 z_0^{-2} \left[\frac{z_0}{1 - K(z_{M0} - z_0)} \right]^A \int_{z_0}^1 \varphi \left[\frac{1 - K(z_{M0} - z_0)}{z_0} \right]^{A-1} dz_0$$

Ecuación que tiene, entre otras, la gran dificultad de que no se conoce a priori z_{M0} .

Conviene para dar un tratamiento universal pasar de la variable z_0 a la variable t definida por:

$$t = AKz_0$$

Se verifica que:

$$A = \frac{1}{1-Kz_M} \quad \frac{1}{A} = 1 - Kz_M \quad Kz_M = \frac{A-1}{A} \quad AKz_M = A - 1$$

Luego,

$$t_M = AKz_M = A - 1$$



$$A = 1 + t_M$$

Con la nueva variable t, resulta:

$$\theta_1 = A^2 K^{2-A} t^{-2} \left(\frac{t}{1+t} \right)^A$$

$$\theta_2 = A^{-3} K^{A-2} \int_0^{AK} \varphi \left(\frac{u}{AK} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{A-1} du$$

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2}{A} \frac{1}{t^2} \left(\frac{t}{1+t} \right)^A \int_t^{AK} \varphi \left(\frac{u}{AK} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{A-1} du$$

El máximo se produce para $q' = 0$, luego según la ecuación diferencial:

$$\eta_{M0}^2 = M_F^2 \varphi$$

Por lo tanto en el máximo se verifica que

$$\varphi \left(\frac{t_M}{AK} \right) = A^{-1} \frac{1}{t_M^2} \left(\frac{t_M}{1+t_M} \right)^A \int_{t_M}^{AK} \varphi \left(\frac{u}{AK} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{A-1} du$$

Pero teniendo en cuenta que:

$$t_M = A - 1, \quad AK = \frac{t_M}{z_{M0}}$$

Resulta para la condición de máximo que,

$$\varphi(z_{M0}) = \frac{t_M^{t_M-1}}{(1+t_M)^{t_M+2}} \int_{t_M}^{\frac{t_M}{z_{M0}}} \varphi \left(u \frac{z_{M0}}{t_M} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{t_M} du$$

En forma compacta:

$$\varphi(z_{M0}) = R(z_{M0}; t_M)$$

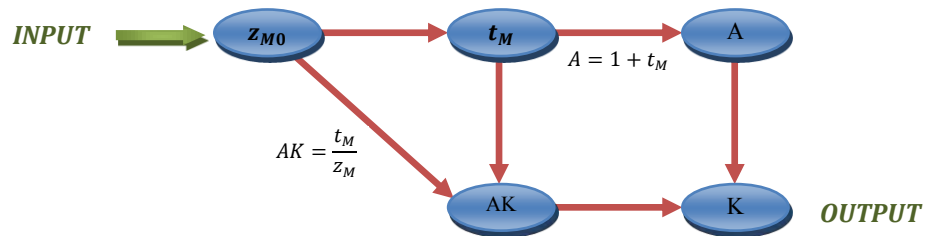
$$\text{Con } R(z_{M0}; t_M) = \frac{t_M^{t_M-1}}{(1+t_M)^{t_M+2}} \int_{t_M}^{\frac{t_M}{z_{M0}}} \varphi \left(u \frac{z_{M0}}{t_M} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{t_M} du$$

Si la fricción es constante $\varphi(z_{M0}) = 1$ y la condición es:

$$R(z_{M0}; t_M) = 1$$

Esta condición permite obtener siempre z_{M0} a partir de z_{M0} o viceversa.

El proceso normal de ajuste sería, conociendo experimentalmente z_{M0} :



La relación $R(z_{M0}; t_M)$ es muy compleja ya que la integral $\int \left(1 + \frac{1}{u}\right)^{t_M} du$ no tiene una primitiva elemental. El problema hay que abordarlo por cálculo numérico.

Los parámetros del modelo con fricción constante son p_c , t , M_F y K (ó z_{M0}). Si la fricción es variable hay que añadir los parámetros que definen $\varphi(z_{M0})$.

4.2.2.3 Curvas asociadas

4.2.2.3.1 Ecuación diferencial general

En este caso coinciden los dos tipos de curvas, las aditivas y las multiplicativas.

$$\alpha_A=0, \alpha_M=1$$

y la ecuación diferencial es:

$$\begin{aligned}\eta_0^2 - 2\eta_0 q' &= M_F^2 \varphi \\ \eta_0^2 + (\eta_0^2)' z_0 &= -M_F^2 \varphi\end{aligned}$$

Cuya integral general es:

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2}{z_0} [\theta(1) - \theta(z_0)]$$

$$\text{Siendo } \theta(z_0) = \int_0^{z_0} \varphi(z_0) dz$$

4.2.2.3.2 Casos particulares interesantes

a) Planteamiento general.

El caso más interesante es una fricción que disminuya monótonamente con la presión.

$$\varphi(z) = \frac{m^{1-\lambda}}{(m+z)^{1-\lambda}} \quad \text{con } -1 < \lambda \leq 1 \text{ y } m > 0$$

Resulta

$$\varphi(z) = \int_0^z \frac{m^{1-\lambda}}{(m+z)^{1-\lambda}} = \frac{m^{1-\lambda}}{\lambda} [(m+z)^\lambda - m^\lambda]$$

$$\varphi(1) = \frac{m^{1-\lambda}}{\lambda} [(m+1)^\lambda - m^\lambda]$$

$$\varphi(1) - \varphi(z) = \frac{m^{1-\lambda}}{\lambda} [(m+1)^\lambda - (m+z)^\lambda]$$

Y la integral resulta

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2 m^{1-\lambda}}{\lambda} \frac{1}{z_0} [(m+1)^\lambda - (m+z)^\lambda]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2 m^{1-\lambda}}{\lambda} z_0 [(m+1)^\lambda - (m+z)_0^\lambda] \\ \frac{p_0}{p_{c0}} = z_0 \end{array} \right.$$

Cuando $\lambda=1$ sale $\varphi=1$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = M_F^2 z_0 (1 - z_0) \\ \frac{p_0}{p_{c0}} = z_0 \end{array} \right.$$

Que es la elipse de Roscoe Burland

b) Casos simples $m=0$.

- Caso 1: Familia general:

$$\varphi = \frac{1}{z_0^{1-\lambda}} \quad \theta(z) = \frac{z_0^\lambda}{\lambda} \quad -1 < \lambda \leq 1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2}{\lambda} z_0 (1 - z_0^\lambda) \\ \frac{p_0}{p_{c0}} = z_0 \end{array} \right.$$

Que da la familia

$$\left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2}{\lambda} \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right) \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right)^\lambda \right]$$

Ecuación 2: Ecuación de la curva de colapso para dilatancia asociada.

Que tiene interés para el ajuste de los datos experimentes. Depende de los parámetros p_{c0} , t , λ y M_F .

- Caso 2: Curva singular $\varphi = \frac{1}{z_0} \lambda=0$:

$$\theta(z) = \int_{\varepsilon}^z \frac{dz}{z} = \ln z - \ln \varepsilon$$

$$\theta(1) = \int_{\varepsilon}^1 \frac{dz}{z} = \ln 1 - \ln \varepsilon = -\ln \varepsilon$$

$$\theta(1) - \theta(z) = -\ln z$$

$$\eta_0^2 = -\frac{M_F^2}{z} \ln z$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = -M_F^2 z \ln z \\ \frac{p_0}{p_{c0}} = z \end{array} \right.$$

$$\frac{q^2}{p_{c0}^2} = -M_F^2 \frac{p_0}{p_{c0}} \ln \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right) = -M_F^2 \frac{p_0}{p_{c0}} (\ln p_{c0} - \ln p_0)$$

4.2.2.3.3 Análisis detallado de la familia del caso 1

$$\text{- Caso } \varphi = \frac{1}{z^{1-\lambda}} \quad -1 < \lambda \leq 1$$

Ecuación diferencial:

$$\eta_0^2 + (\eta_0^2)' z_0 = -\frac{M_F^2}{z^{1-\lambda}} \quad \eta_0^2 - 2\eta_0 q' = M_F^2 \varphi$$

La integral es

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2}{z_0} (1 - z_0^\lambda), \quad \left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2}{\lambda} \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right) \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right)^\lambda \right]$$

$$2 \frac{q q'}{p_{c0}^2} = \frac{M_F^2}{\lambda p_{c0}} \left[1 - (1 + \lambda) \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right)^\lambda \right]$$

$$q' = M_F^2 \frac{p_{c0}}{2q} \left[1 - (1 + \lambda) \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right)^\lambda \right]$$

La pendiente es infinita ∞ para $p_0=0$ y $p_0=p_{c0}$ ya que $q=0$.

El máximo se produce para $q'_M = 0$

$$(1 + \lambda) \left(\frac{p_0}{p_{c0}} \right)^\lambda = 1 \quad \frac{p_0}{p_{c0}} = \frac{1}{(1+\lambda)^{1/\lambda}} = z_M$$

La curva de máximos de la familia viene dada por $q'_M = 0$, $\eta_{0M}^2 = M_F^2 \varphi = M_F^2 z_M^{\lambda-1}$

Ec. Paramétricas:

$$\begin{cases} \eta_{0M}^2 = M_F^2 (1 + \lambda)^{1-\lambda/\lambda} \\ z_M = (1 + \lambda)^{-1/\lambda} \end{cases} \quad -1 < \lambda \leq 1$$

Para $\lambda=0$ $\dashrightarrow z_M=e-1$ $\dashrightarrow \eta_{0M}^2 = M_F^2 e$

En la Fig. 4.6 se muestran diferentes curvas de fluencia para varios valores de λ .

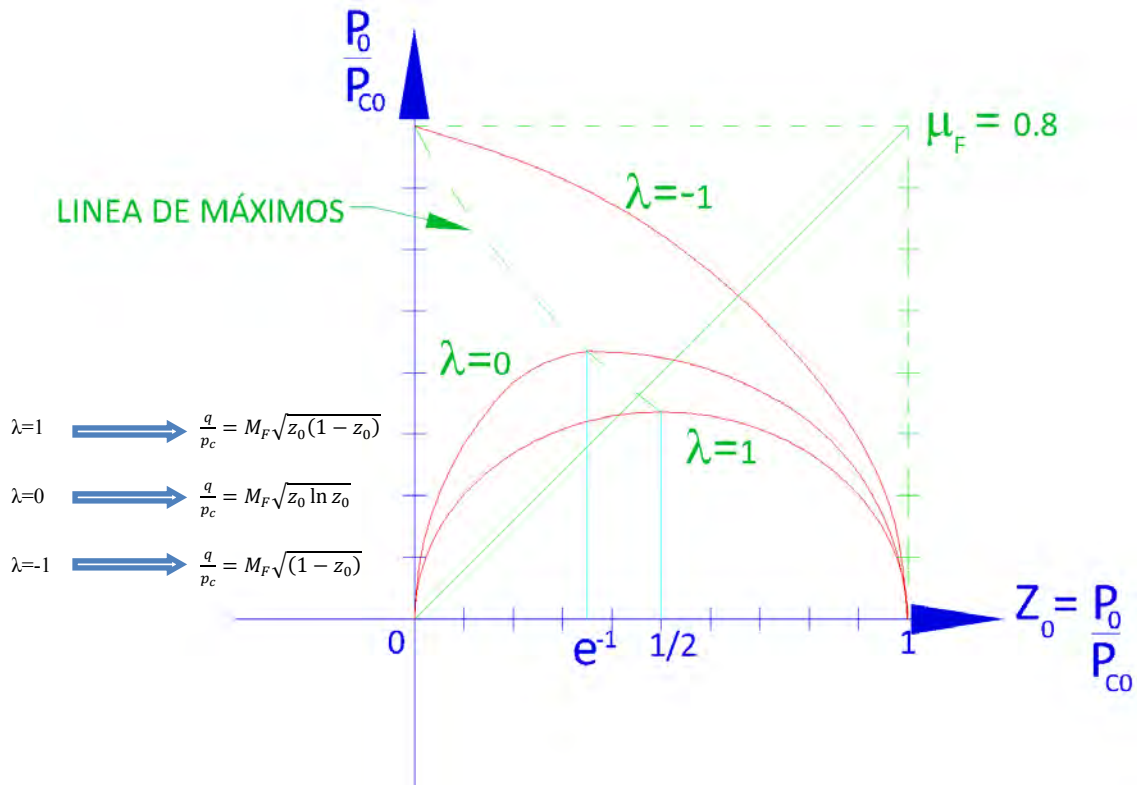


Fig. 4.6: Curvas asociadas para diferentes λ .

4.2.3 RESUMEN

4.2.3.1 Sobre los fundamentos

4.2.3.1.1 Trabajo externo para la rotura

Se plantea una formulación nueva del trabajo externo ΔT_p para la rotura que facilita la incorporación de los materiales coherentes a una formulación energética,

$$\Delta T_p = \left(\psi + \eta_0 - \frac{t}{p_0} \psi \right) p_0 d\gamma^p$$

4.2.3.1.2 Consumo de energía en la rotura

Se propone una nueva ley de consumo energético:

$$F^*(\psi, \eta_0) = (\psi^2 + M_F^2 \varphi + K_I)^{1/2}$$

$$\text{Siendo } K_I = \left(\frac{\psi t}{p_0} \right)^2 - 2\psi \frac{t}{p_0} (\psi + \eta_0)$$

En la que se ha introducido la influencia de:

- La cohesión, con el parámetro t
- La variación de la fricción con la función φ

4.2.3.1.3 Ley teórica de consumo

Como resultado de lo anterior se propone la ley de consumo ampliada:

$$\eta_0^2 + 2\eta_0\psi = M_F^2\varphi$$

4.2.3.1.4 Dilatancia

Se analizan las consecuencias de los dos tipos de Dilatancia no asociada y asociada.

Para las dilataancias no-asociadas se realizan dos enfoques: Aditivo y Multiplicativo.

1º. Dilatancia no-asociada, enfoque aditivo:

$$\psi + q' = \alpha_A \quad \text{con } \alpha_A \geq 0 \quad \alpha_A = \text{constante.}$$

2º. Dilatancia no-asociada, enfoque multiplicativo:

$$\psi + \alpha_\mu q' = 0 \quad \text{con } (1 - \alpha_\mu)q' \geq 0$$

3°. Dilatancia asociada:

$$\psi + q' = 0$$

En esta hipótesis coinciden los dos enfoques con los parámetros $\alpha_A = 0$, $\alpha_M = 1$

4.2.3.2 Curvas de colapso. Dilatancia no asociada aditiva

4.2.3.2.1 Ecuaciones diferenciales

$$\text{Ecuación en } q' \quad \eta_0^2 + 2\alpha_A \eta_0 - 2\eta_0 q' = M_F^2 \varphi$$

$$\text{Ecuación en } \eta'_0 \quad -\eta_0^2 + 2\alpha_A \eta_0 - 2\eta_0 \eta'_0 p_0 = M_F^2 \varphi$$

4.2.3.2.2 Curva de colapso cuando $\varphi=1$ y $\alpha_A = a$

$$\frac{p_{c0}}{p_0} = \frac{M_F^2 + \eta_0^2 - 2a\eta_0}{M_F^2} \text{Exp} \left[\frac{2a}{s} \arctan \left(\frac{\eta_0 s}{M^2 - a\eta_0} \right) \right]$$

$$\text{Con } M_F^2 - a^2 = s^2$$

4.2.3.3 Curvas de colapso dilatancia no asociada multiplicativa

4.2.3.3.1 Ecuaciones diferenciales

$$\text{Ecuación en } q' \quad \eta_0^2 - 2\alpha_M \eta_0 q' = M_F^2 \varphi$$

$$\text{Ecuación en } \eta'_0 \quad (1 - 2\alpha_M)\eta_0^2 - 2\alpha_M \eta_0 \eta'_0 p_0 = M^2 \varphi$$

4.2.3.3.2 Curvas de colapso

a) Caso general.

$$\eta_0^2 = -M_F^2 \theta_1(z_0)[\theta_2(1) + \theta_2(z_0)]$$

$$\text{Con } \theta_1 = \text{Exp} \left[\int_0^{z_0} \frac{\lambda}{z_0} dz_0 \right], \text{ con } \lambda = \frac{1-2\alpha_M}{\alpha_M}, z_0 = \frac{p_0}{p_{c0}}$$

$$\theta_2 = \int_0^{z_0} \frac{\varphi dz_0}{\alpha_M z_0 \theta_1}$$

b) Caso particular $\alpha_M = 1 - K(z_{M0} - z_0) = A + Kz_0$

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2}{A} \frac{1}{t^2} \left(\frac{t}{1+t} \right)^A \int_t^{AK} \varphi \left(\frac{u}{AK} \right) \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{A-1} du, \quad t = AKz_0$$

Cuando $\varphi \equiv 1$,

$$\eta_0^2 = \frac{M_F^2}{A} \frac{1}{t^2} \left(\frac{t}{1+t} \right)^A \int_t^{AK} \left(1 + \frac{1}{u} \right)^{A-1} du$$

4.2.3.4 Curvas de colapso asociadas

4.2.3.4.1 Ecuaciones diferenciales

$$\eta_0^2 - 2\eta_0 q' = M_F^2 \varphi, \quad \eta_0^2 + (\eta_0^2)' z_0 = -M_F^2 \varphi$$

Caso cuasigeneral $\varphi(z_0) = \frac{m^{1-\lambda}}{(m+z)^{1-\lambda}}$

$$\left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2 m^{1-\lambda}}{\lambda} z_0 [(m+1)^\lambda - (m+z)_0^\lambda]$$

Caso particular $\varphi(z_0) = \frac{1}{z_0^{1-\lambda}}$

$$\left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = \frac{M_F^2}{\lambda} z_0 (1 - z_0^\lambda)$$

Si $\lambda=0$

$$\left(\frac{q}{p_{c0}} \right)^2 = -\mu_F^2 z_0 \ln z_0$$

4.3 MODELO EMPÍRICO: AJUSTE EMPÍRICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.3.1 CRITERIOS DE ROTURA UNIFICADOS

4.3.1.1 Variables

Se usan las variables de Cambridge:

$$q^* = \sigma_1^* - \sigma_3^*$$

$$p^* = \frac{\sigma_1^* + 2\sigma_3^*}{3}$$

El asterisco (*) indica que las variables tienen dimensiones.

Las variables se hacen adimensionales dividiendo por el módulo de presión β .

$$q = \frac{q^*}{\beta} \quad p = \frac{p^*}{\beta}$$

p y q son variables adimensionales.

Las variables se hacen canónicas mediante una traslación en el eje de las presiones normales (Fig. 4.7).

$$p_0^* = p^* + t$$

$$p_0 = p + \zeta$$

Con: $t^* = \beta\zeta$

- t es la resistencia a la tracción isotropa.
- ζ es el coeficiente de tenacidad.

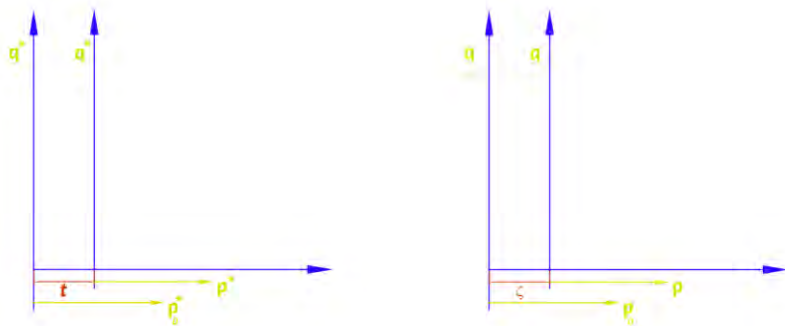


Fig. 4.7: Traslación de ejes. Variables canónicas.

4.3.1.2 Familias de curvas de colapso unificadas

Se propone como expresión general de las curvas de colapso (En forma adimensional canónica):

$$\varphi(q) = M \, \mathcal{F}(p_0)$$

Con:

$$\varphi(q) = q^{k+1} + 2kq$$

$$\mathcal{F}(p_0) = p_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda$$

Donde k es un coeficiente que indica el tipo de ley de resistencia que tiene el material a bajas presiones.

k=0, corresponde a resistencia Parabólico Colapsable (P).

k=1, resistencia tipo Elíptico Colapsable (E).

λ es un coeficiente que verifica $0 < \lambda < 1$. Que se deben ajustar mediante ensayos.

p_c es la presión de colapso, que se halla con ensayos de resistencia isótropa.

M es un coeficiente ligado al ángulo de rozamiento instantáneo inicial ρ_0 .

$$\frac{M}{k+1} = \left(\frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0} \right)$$

En el caso E $\sin \rho_0 = 1$ $M = 6$.

En el caso de P, se debe ajustar mediante los ensayos.

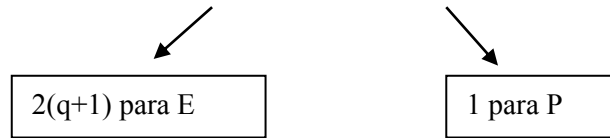
4.3.1.3 Ángulo de rozamiento instantáneo y máximo de la curva de colapso

A). Ángulo de rozamiento instantáneo.

El ángulo de rozamiento instantáneo viene dado, a partir de la expresión:

$$\varphi'(q) \frac{dq}{dp} = M f'(p_0)$$

$$\varphi'(q) = (k + 1)q^k + 2k$$



$$f'(p_0) = \frac{1 - (1 + \lambda) \frac{p_0}{p_{c0}}}{\left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^{1-\lambda}}$$

En general:

$$\frac{dq}{dp} = M \frac{f'(p_0)}{\varphi'(q)} = \left[\frac{M}{(k + 1)q^k + 2k} \right] \left[\frac{1 - \frac{(1 + \lambda)p_0}{p_{c0}}}{\left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^{1-\lambda}} \right] = \frac{6 \sin \rho}{3 - \sin \rho}$$

En particular:

$$\text{Para } p_0=0 \quad \left(\frac{dq}{dp} \right)_{p_0=0} = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0} = \frac{M}{k+1}$$

En el caso E, donde $k=1$ y $\rho_0=\Pi/2$, se tiene una $M=6$.

En el caso P, donde $k=0$, M tiene un valor específico del material que depende de ρ_0 .

$$\text{Para } p_0=p_{c0} \quad \left(\frac{dq}{dp} \right)_{p_0=p_{c0}} \text{ vale:}$$

- ∞ para $\lambda < 1$
- $-\frac{M}{k+1}$ para $\lambda = 1$

B). Máximo de la curva de colapso (Fig. 4.8)

El máximo de la curva de colapso se produce para:

$$\frac{dq}{dp} = 0$$

$$f'(p_0) = 0$$

Que equivale a:

$$1 - (1 + \lambda) \frac{p_0}{p_{c0}} = 0$$

$$\lambda = \frac{p_0}{p_{M0}} - 1$$

Es decir:

$$p_{M0} = \frac{p_{c0}}{1 + \lambda}$$

p_{M0} es el valor de p_0 en el máximo M.

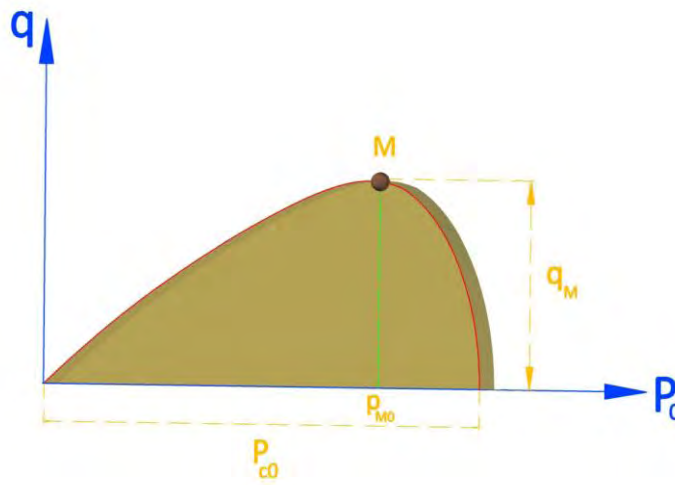


Fig. 4.8: Coordenadas del punto máximo M.

En el máximo M, q_M viene dado por la ecuación:

$$q_M^{k+1} + 2kq_M = M \left(1 - \frac{p_{M0}}{p_{c0}} \right)^\lambda p_{M0} = Mp_{c0} \frac{\lambda^\lambda}{(1 + \lambda)^{1+\lambda}}$$

La eliminación de λ entre las expresiones que dan p_{M0} y q_M en función de λ , da la ecuación implícita de la trayectoria de los máximos M al variar el coeficiente λ de la

familia (Fig. 4.9).

$$q^{k+1} + 2kq_M = Mp_{M0} \left(1 - \frac{p_{M0}}{p_{c0}}\right)^{\frac{p_{c0}}{p_{M0}} - 1}$$

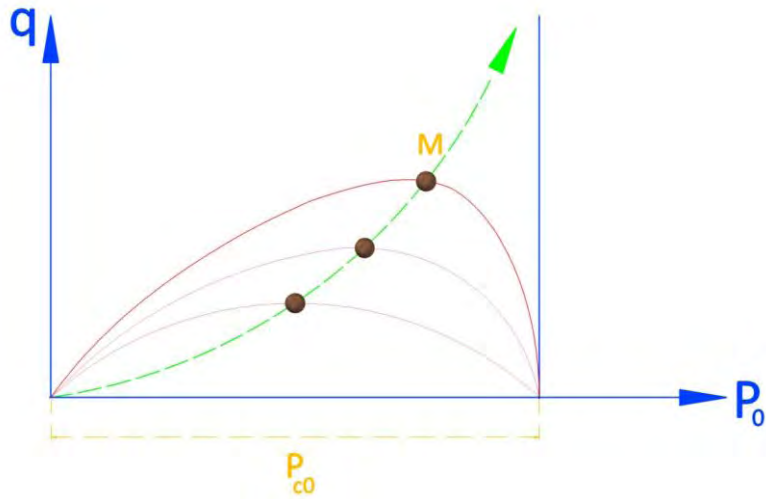


Fig. 4.9: Familias de curvas de colapso para diferentes valores de λ . Se muestra la curva correspondiente a los máximos, M .

4.3.1.4 Aspecto de la familia E (Fig. 4.10)

Ecuación de la familia $k=1$

$$q^2 + 2q = 6p_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda$$

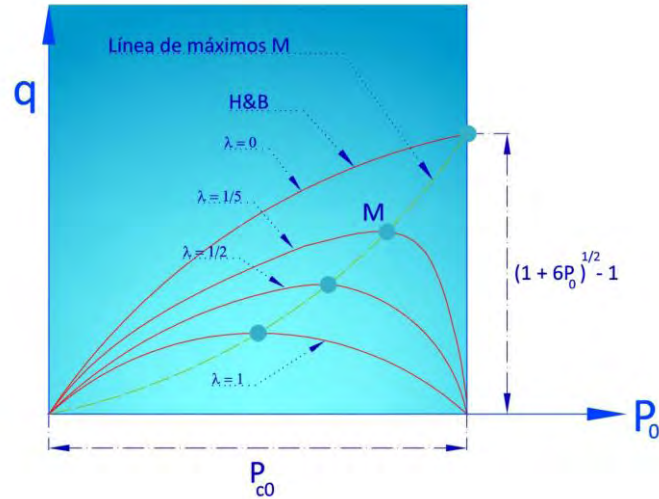


Fig. 4.10: Familias de curvas para el caso Elíptico Colapsable.

4.3.1.5 Aspecto de la familia P (Fig. 4.11)

Ecuación de la familia:

$$q = Mp_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda, \quad \text{con } M = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0}$$

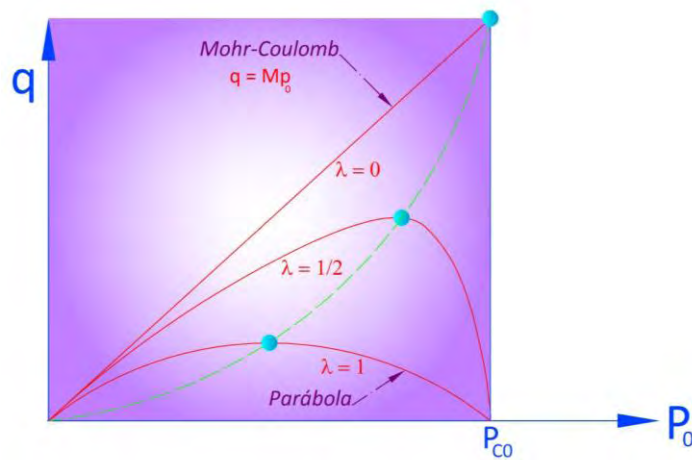


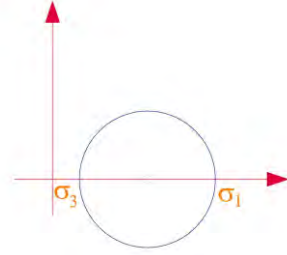
Fig. 4.11: Familias de curvas de rotura para el caso Parabólico Colapsable.

4.3.1.6 Criterio Parabólico Colapsable (2D). Variables de Hill

1. Definición de las variables.

Las variables de Hill son:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



Y las variables de Cambridge están definidas de las siguientes formas:

$$p_c = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, \quad q_c = \sigma_1 - \sigma_3$$

Las ecuaciones de paso entre Hill y Cambridge son:

$$q_c = 2q, \quad p_c = p - \frac{q}{3} \quad (\text{Ec.1})$$

2. Criterio Parabólico Colapsable (Caso $\lambda=1$).

2.1. En variables de Cambridge:

$$q_c = Mp_c(1 - p_c) \quad (\text{Con módulo } p_{co}) \quad (\text{Ec.2})$$

El valor máximo de q (Fig. 4.12), se produce para $(p_{co})_{\text{máx.}}=1/2$, y vale:

$$q_{c,\text{máx}} = \frac{M}{4}$$

Donde M, es el parámetro de fricción y vale:

$$M = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0}$$

Siendo ρ_0 el ángulo de rozamiento instantáneo para $p_c = 0$.

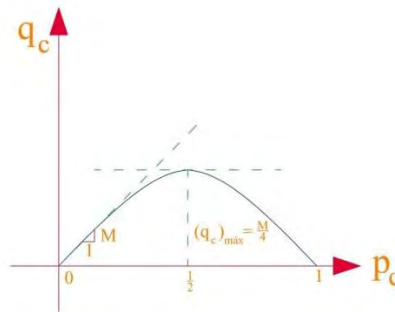


Fig. 4.12: Valor máximo de q.

2.2. En variables de Hill.

a) Ecuación:

Llevando las Ec.1 a la Ec.2, se obtiene lo siguiente:

$$2q = M \left(p - \frac{q}{3} \right) \left(1 - \left[p - \frac{q}{3} \right] \right) \quad (\text{Ec.3})$$

Que se puede poner en la forma:

$$q = 3 \left(-k + p + \sqrt{k^2 - 2ap} \right) \quad (\text{Ec.4})$$

Con:

$$k = \frac{6+M}{2M}, a = \frac{3}{M}$$

La Ec.4 es la expresión en variables de Hill del criterio Parabólico Colapsable.

Si se deriva la Ec.3 respecto a p se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dq}{dp} = \frac{3ME}{6+ME} = \sin \rho \quad (\text{Ec.5})$$

$$\text{con } E = 1 - 2 \left(p - \frac{q}{3} \right).$$

Derivando la Ec.4, se obtiene:

$$\frac{dq}{dp} = 3 \left[1 - \frac{a}{\sqrt{k^2 - 2ap}} \right] = \sin \rho \quad (\text{Ec.6})$$

b) Formas de la curva:

El máximo de la curva de colapso se produce para:

$$p_{\text{máx}} - \frac{q_{\text{máx}}}{3} = \frac{1}{2}$$

El valor máximo es:

$$q_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \frac{M}{4} = \frac{M}{8} \quad (\text{Ec.7})$$

Luego:

$$p_{\text{máx}} = \frac{1}{2} + \frac{q_{\text{máx}}}{3} = \frac{1}{2} + \frac{M}{24} \quad (\text{Ec.8})$$

c) Rotura por desestructuración:

El rozamiento instantáneo ρ , viene dado por la Ec.5 o bien por la Ec.6.

Se observa que dependiendo del valor de M, puede ser que sea $|\sin \rho| > 1$. En ese caso no existe envolvente de Mohr de los círculos de tensiones y la rotura no es

plástica sino por desestructuración.

Este hecho fue previsto por Hill, en su libro de plasticidad de 1950, y comprobado su realidad de forma experimental por Goncharov (1965).

Se comprueba así la existencia de tres zonas de la curva de colapso (en su caso más general, $M > 3$):

- 1º = ZDT, zona de rotura por desestructuración de la muestra. Esta zona se produce para presiones p inferiores a una cierta $P_{crit,T}$.
$$p < p_{crit,T} = \left(\frac{M+15}{24M} \right) (M-3)$$

(Ec.9).
- 2º = ZDC, zona de rotura por desestructuración de la muestra. Esta zona se presenta para valores de presiones p superiores a la presión crítica $P_{crit,C}$.
$$p > p_{crit,C} = 1 + \left(\frac{21-2M}{48M} \right) \left(\frac{3}{2} - M \right)$$

(Ec.10).
- 3º = ZP, zona de rotura plástica que se produce para las siguientes presiones, p :

$$p_{crit,T} < p < P_{crit,C}$$

Como se puede observar, en la ecuación Ec.9, para valores de M menores que 3, $p_{crit,T} < 0$, es decir, que hay que dar presiones de tracción a la muestra para que se produzca la desestructuración.

Por otra parte, con la ecuación Ec.10, se encuentra que para valores de $M < 1.5$, $p_{crit,C} > 1$, es decir, que habría que dar presiones p superiores a la del colapso (p_{co}), que son imposibles, para que la rotura fuera por desestructuración. En el caso de $M < 1.5$ la rotura es siempre plástica por corte.

En resumen:

Si $M < 1.5$, sólo hay ZP (Rotura Plástica).

Si $1.5 < M < 3$, existe:

- Para $p < p_{crit,C}$ rotura ZP
- Para $p > p_{crit,C}$ rotura ZDC

Si $M > 3$, existe:

- Para $p < p_{crit,T}$ rotura ZDT
- Para $p_{crit,T} < p < p_{crit,C}$ rotura ZP
- Para $p > p_{crit,C}$ rotura ZDC

En la Fig. 4.13 se muestran las zonas de rotura para los distintos valores de M y la posición de las presiones críticas $p_{crit,T}$ y $p_{crit,C}$ y su evolución en función de M .

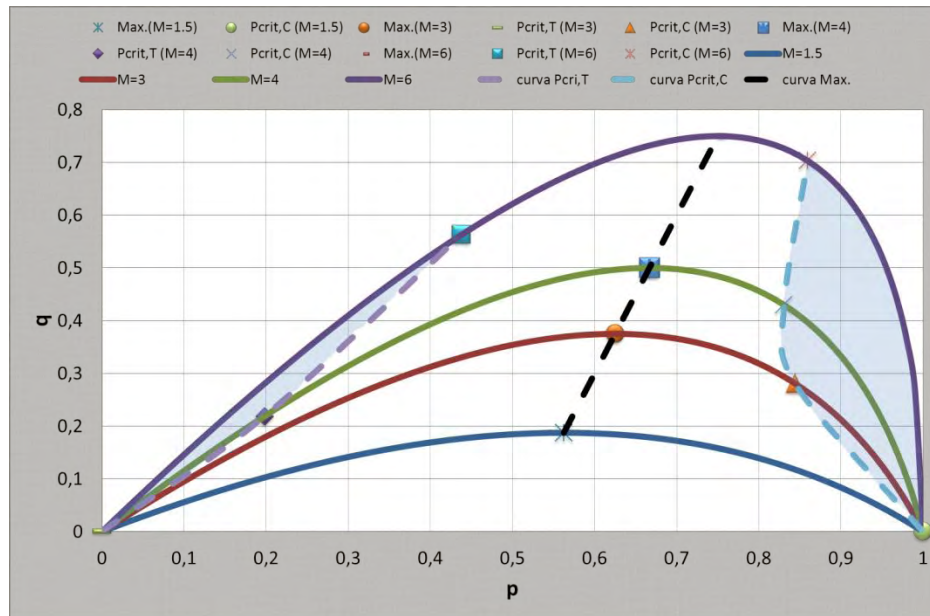


Fig. 4.13: Zonas de rotura para los distintos valores de M y la posición de las presiones críticas $p_{(crit.,T)}$ y $p_{(crit.,C)}$ y su evolución en función de M

d) Evolución de las formas de rotura en función de la presión:

En la Fig. 4.14 expone las curvas del criterio de rotura desarrollado en este capítulo tanto en tensiones (Fig. 4.14) como en deformaciones (Fig. 4.14), y se analizan cada punto con sus respectivos planos de rotura.

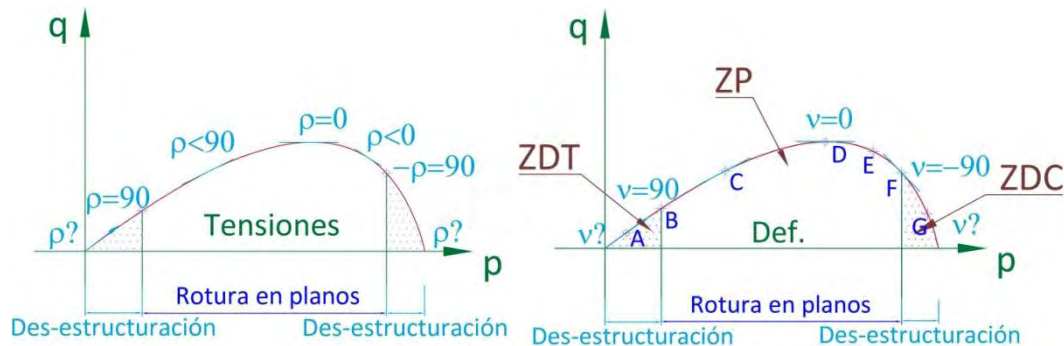


Fig. 4.14: Criterio de rotura en tensiones y deformaciones.

En el criterio de rotura en tensiones se pueden distinguir diferentes zonas en función del valor del ángulo de rozamiento instantáneo, ρ , tal y como se indica en la Fig. 4.14. Si se adopta una ley de fluencia asociada, donde $\rho=v$ (dilatancia), los diferentes casos mostrados en la Fig. 4.14, estarían representados por los círculos de deformaciones representados en la Fig. 4.15; en esta figura se muestra también los planos de roturas y sus ángulos.

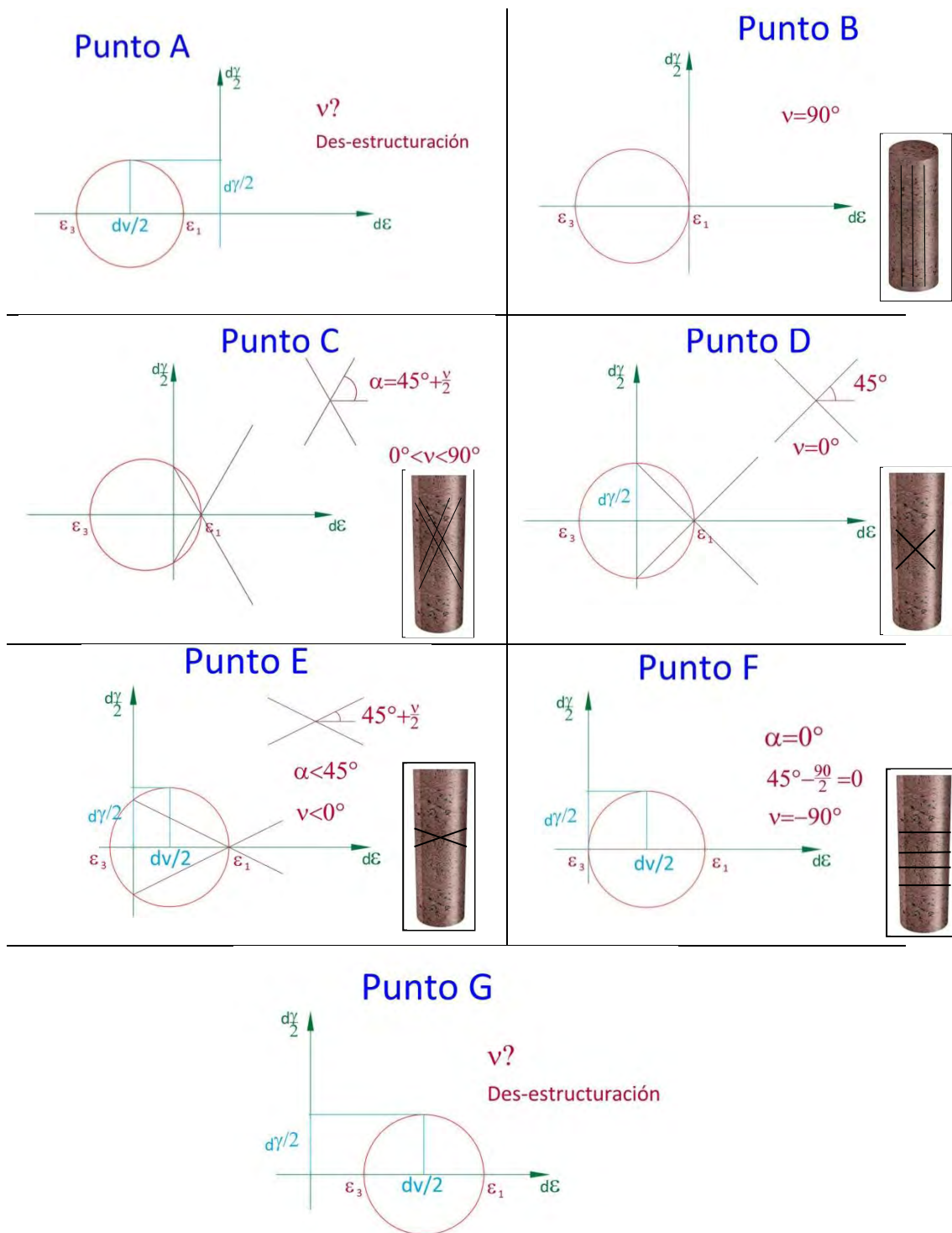


Fig. 4.15: Diferentes círculos de deformación para cada uno de los puntos dibujados en la Fig. 4.14.

En la zona en la que se encuentra el punto A se produce un aumento de volumen (dilatancia) y el valor de $\sin \nu = \frac{dq}{dp}$ deja de ser real, ya que se hace mayor que la unidad. Por tanto el material deja de comportarse de acuerdo a la teoría de la plasticidad, como un material con rozamiento, y la rotura de las muestras ya no sigue unos planos definidos y se produce la “des-estructuración” de las mismas.

El límite de esta zona estaría en el punto B en el que el valor de ρ es 90° ($\frac{dq}{dp}=1$), a partir del cual el material cumpliría con la teoría de la plasticidad y rompería según unos planos inclinados $45^\circ \pm \frac{\nu}{2}$ con la horizontal, a medida que se avanza desde el punto B al punto D los planos de rotura se van produciendo con un ángulo cada vez menor, en este último punto la dilatancia es cero por lo que no existe cambio de volumen y los planos de rotura forman un ángulo con la horizontal de 45° . Para el caso de la zona en la que se encuentra el punto E, los planos de rotura se van horizontalizando hasta llegar a ser del todo horizontales. En el punto F, en el cual se pasa a otra zona desestructurada en la que se deja de cumplir de nuevo la teoría de la plasticidad, ocurre lo mismo que en el punto A solo que en lugar de producirse un aumento de volumen las probetas se comprimen todo el tiempo.

4.3.2 DETERMINACION DE PARÁMETROS

4.3.2.1 Procedimiento general

A). PASO 1: determinación de valores medios (Fig. 4.16).

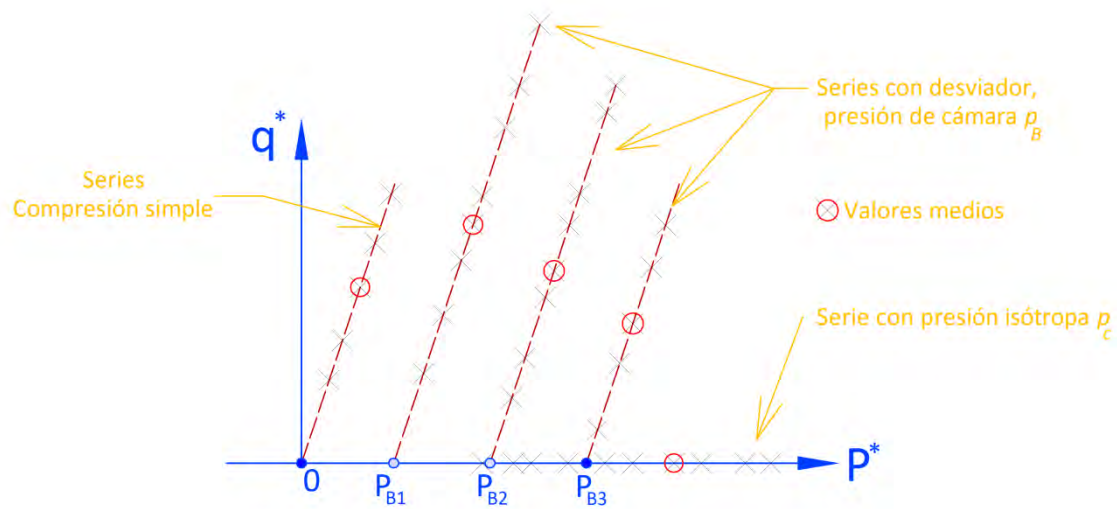


Fig. 4.16: Determinación de los valores medios.

-En un principio se determinan los valores medios de los resultados de cada uno de las series:

De ensayos σ_c^* de compresión simple.

De desviadores q_{Bi}^* de cada una de las series i de ensayos con presión de cámara P_{Bi}

De los resultados p_c de los ensayos de compresión isotropa.

-Se trabaja con resultados dimensionales (porque no se conoce el módulo de presión β).

B). PASO 2: preparación de datos (Fig. 4.17).

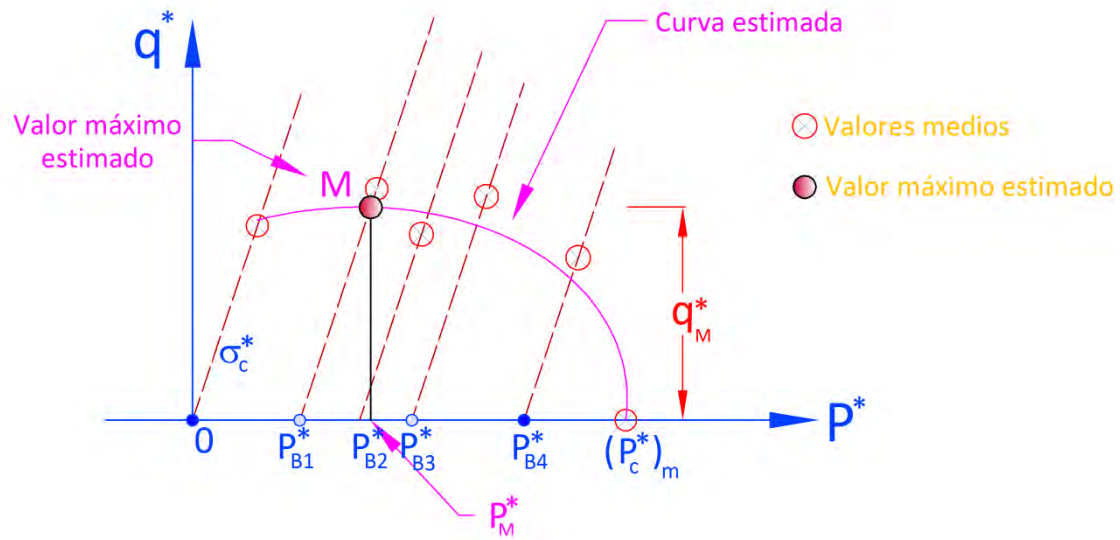


Fig. 4.17: Preparación de los datos.

-Se dibujan los valores medios de los resultados de:

- Ensayos de compresión simple.
- Ensayos con presión isotrópica P_{Bi}
- Ensayos de colapso.

-Se dibuja a sentimiento la curva de colapso en la zona de máximos.

-Se estima el punto M del máximo de la curva de colapso.

-Se determinan las coordenadas de M: P_M^* y q_M^*

C). PASO 3: resumen de datos de partida.

Para la determinación de parámetros se parte de los siguientes datos.

σ_c^* Valor medio de la resistencia a compresión simple.

p_c^* Valor medio de la resistencia isotrópica al colapso.

P_M^* q_M^* Valores del máximo de la curva de colapso.

4.3.2.2 Cálculo de los valores β , t , λ iniciales (Caso E)

A). Datos:

$$\sigma_c^*, p_c^*, q_M^*, p_M^*.$$

Que corresponden a los puntos: CS, CO, M (Fig. 4.18)

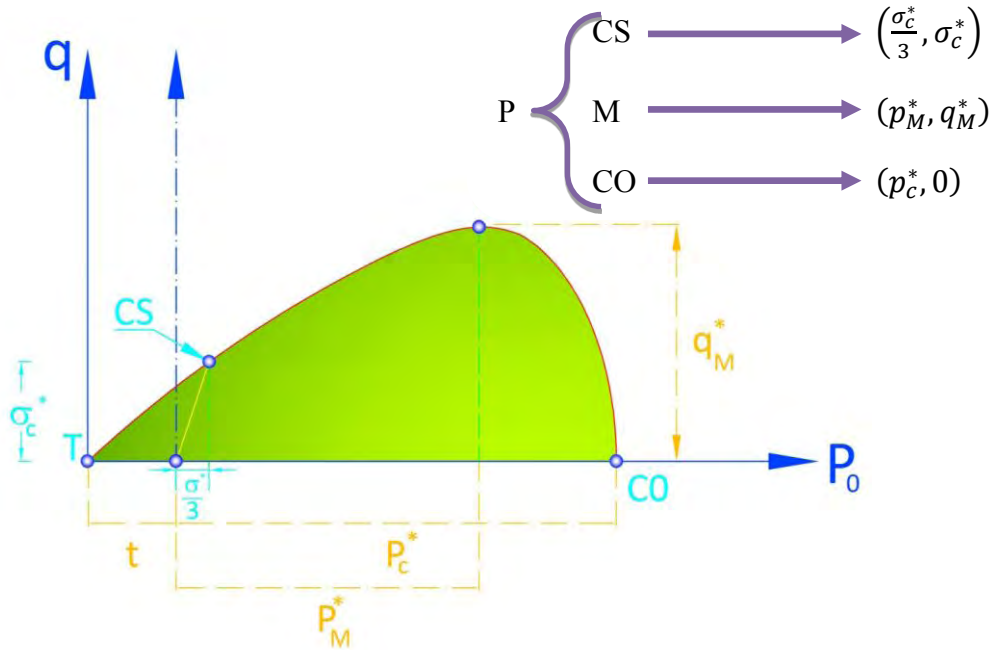


Fig. 4.18: Coordenadas de los puntos CS, CO y M.

B). Ecuación de la curva de colapso (dimensional):

$$q^{*2} + 2\beta q^* = 6\beta(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda \quad (1)$$

C). Sistema resolvente:

Ec(1) particularizada para el punto CS

$$(\sigma_c^*)^2 + 2\beta \sigma_c^* = 6\beta \left(\frac{\sigma_c^*}{3} + t\right) \left(1 - \frac{\frac{\sigma_c^*}{3} + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda$$

De donde:

$$2\beta = \frac{(\sigma_c^*)^2}{(\sigma_c^* + 3t) \left(1 - \frac{\sigma_c^* + 3t}{3(p_c^* + t)}\right)^\lambda - \sigma_c^*} \quad (2)$$

Ec(1) particularizada para el punto M

$$(q_M^*)^2 + 2\beta q_M^* = 6\beta(p_M^* + t) \left(1 - \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda$$

De donde:

$$2\beta = \frac{(q_M^*)^2}{3(p_M^* + t) \left(1 - \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda - q_M^*} \quad (3)$$

Condición de máximo en M:

$$1 - (1 + \lambda) \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t} = 0$$

De donde:

$$\lambda = \frac{p_c^* + t}{p_M^* + t} - 1 = \lambda(t) \quad (4)$$

- Los puntos CO y T verifican automáticamente la ecuación (1).
- El sistema resolvente está formado por las ecuaciones 2, 3 y 4 que proporcionarán los valores a las incógnitas β , t , λ .

D) Solución del sistema:


-Se llaman β_s al valor del parámetro β calculado según la ecuación (2), y β_M al calculado según (3).

-Se lleva la expresión (4) de λ a (2) y (3) con lo que el sistema se reduce a las ecuaciones (2') y (3') con las únicas incógnitas β , t .

$$2\beta_s = \frac{(\sigma_c^*)^2}{(\sigma_c^* + 3t) \left(1 - \frac{\sigma_c^* + 3t}{3(p_c^* + t)}\right)^{\lambda(t)} - \sigma_c^*} \quad (2')$$

$$2\beta_M = \frac{(q_M^*)^2}{3(p_M^*+t)\left(1-\frac{p_M^*+t}{p_c^*+t}\right)^{\lambda(t)} - q_M^*} \quad (3')$$

Se iguala β_s a β_M , con lo que queda una única ecuación (5) con una sola incógnita t ,

$$\beta_s = \beta_M$$

$$\frac{(\sigma_c^*)^2}{(\sigma_c^*+3t)\left(1-\frac{\sigma_c^*+3t}{3(p_c^*+t)}\right)^{\lambda(t)} - \sigma_c^*} = \frac{(q_M^*)^2}{3(p_M^*+t)\left(1-\frac{p_M^*+t}{p_c^*+t}\right)^{\lambda(t)} - q_M^*} \quad (5)$$

La ecuación (5) se resuelve con una hoja de cálculo, buscando el valor de t que hace cero la expresión $D(t) = 2\beta_s(t) - 2\beta_M(t)$

Se parte de $t = \frac{\sigma_c^*}{3}$ y se va aumentando hasta que $D(t)$ sea cero.

Una vez determinado (t) , inmediatamente se tiene que:

$$\beta = \beta_s(t) \equiv \beta_M(t) \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{p_c^* + t}{p_M^* + t} - 1$$

NOTA:

Para $\lambda=1$ el ajuste de parámetros es muy sencillo, y se expone a continuación.

- Datos σ_c^*, p_c^*, p_M^*
- Ajuste:
 - o La ecuación 4 con $\lambda=1$ da: $t = 2p_M^* - p_c^*$
 - o La ecuación 2 da: $\beta = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^*}{(\sigma_c^*+3t)\left[1-\frac{\sigma_c^*+3t}{3(p_c^*+t)}\right]}$
- Comprobación: debe verificarse la ecuación 3.

Alternativamente en vez de p_M^* podría utilizarse q_M^* . En ese caso la ecuación (3) daría el parámetro β y la ecuación 2 serviría de comprobación.

4.3.2.3 Cálculo de los valores iniciales M , t , λ (Caso P)

A) Datos:

$$\sigma_c^*, p_c^*, q_M^*, p_M^*$$

Como en el caso de E.

B) Ecuación de la curva de colapso (dimensional):

$$q^* = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda \quad (1)$$

$$M = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0}$$

C) Sistema resolvente:

- Ec(1) particularizada para el punto CS

$$\sigma_c^* = M \left(\frac{\sigma_c^*}{3} + t \right) \left(1 - \frac{\frac{\sigma_c^*}{3} + t}{p_c^* + t} \right)^\lambda$$

De donde:

$$M = \frac{\sigma_c^*}{\left(\frac{\sigma_c^*}{3} + t \right) \left(1 - \frac{\frac{\sigma_c^*}{3} + t}{p_c^* + t} \right)^\lambda} \quad (2)$$

- Ec(1) particularizada para el punto M

$$q_M^* = M(p_M^* + t) \left(1 - \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t} \right)^\lambda$$

De donde:

$$M = \frac{q_M^*}{(p_M^* + t) \left(1 - \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t} \right)^\lambda} \quad (3)$$

- Condición de máximo en M:

$$1 - (1 + \lambda) \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t} = 0$$

De donde:

$$\lambda = \frac{p_c^* + t}{p_M^* + t} - 1 = \lambda(t) \quad (4)$$

D) Solución del sistema:

Se elimina λ , llevando λ sacada de (4) a (2) y (3); con lo que resultan las ecuaciones (2') y (3'),

Llamando:

$$M_s = \frac{\sigma_c^*}{\left(\frac{\sigma_c^*}{3} + t\right) \left(1 - \frac{\frac{\sigma_c^*}{3} + t}{p_c^* + t}\right)^{\lambda(t)}}$$
$$M_M = \frac{q_M^*}{(p_M^* + t) \left(1 - \frac{p_M^* + t}{p_c^* + t}\right)^{\lambda(t)}}$$

E igualando

$$M_s = M_M$$

Se elimina M y queda una única ecuación en t.

La solución de esta ecuación se hace con una hoja de cálculo, buscando el valor de (t) que hace:

$$M_s(t) - M_M(t) = 0$$

Determinado t, el valor de M viene dado por:

$$M = M_s(t) \equiv M_M(t)$$

Y el valor de λ por la ecuación 4

E) Verificación final:

Determinado M, se encuentra $\text{sen} \rho_0$

$$\sin \rho_0 = \frac{3M}{6 + M}$$

se debe analizar $\text{sen} \rho_0$, comprobando si es razonable.

NOTA:

Para el caso $\lambda=1$; el ajuste de parámetros es más sencillo.

- Datos: σ_c^* , p_c^* , p_M^*
- Ajuste:
 - o De la ecuación

$$\lambda = \frac{p_c^* + t}{p_M^* + t} - 1, \text{ con } \lambda=1.$$

sale:

$$t = p_c^* - 2p_M^*.$$

- o Por otra parte, la ecuación (2) da:

$$M = \frac{\sigma_c^*}{\left(\frac{\sigma_c^*}{3} + t\right) \left(1 - \frac{\frac{\sigma_c^*}{3} + t}{p_c^* + t}\right)}$$

en la que se introduce el valor de t.

- o Como comprobación ha de verificarse la ecuación 3.

Alternativamente, podría utilizarse q_M^* en vez de p_M^* . La ecuación (3) daría el valor de M, y la ecuación (2) serviría de comprobación.

4.3.3.2 Error cuadrático

A). Error cuadrático de una serie (Fig. 4.20):

El error cuadrático E_i de la serie i de ensayos con presión de cámara constante p_{Bi}^* vale:

$$E_i = \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}^2 = \sum_{j=1}^{n_i} [(q_{ij}^* - q_{Ai}^*)^2 + (p_{ij0}^* - p_{Ai0}^*)^2]$$

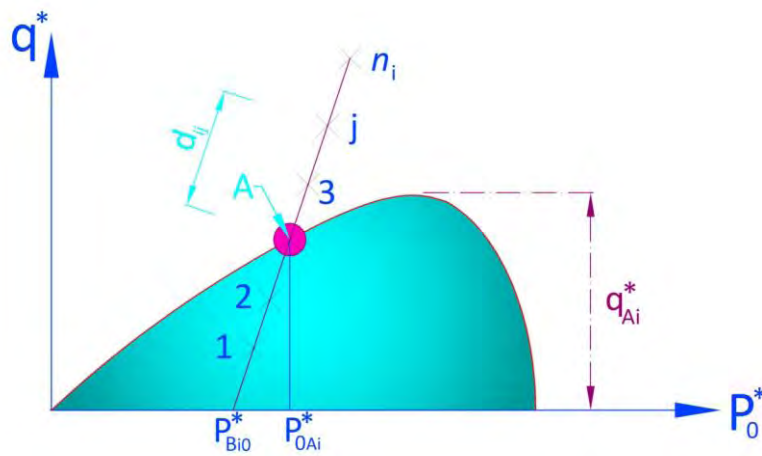


Fig. 4.20: Cálculo del error cuadrático.

B). Error cuadrático total:

Es la suma de los errores cuadráticos de todas las series.

$$E = \sum_{i=1}^m E_i$$

Se incluye además de las series con presión isotrópica de cámara p_{B0i}^* , la serie de compresiones simples, y la serie de los ensayos isotrópicos de colapso.

$E = E(VR, p_c^*, \lambda, \beta)$ en el caso de E

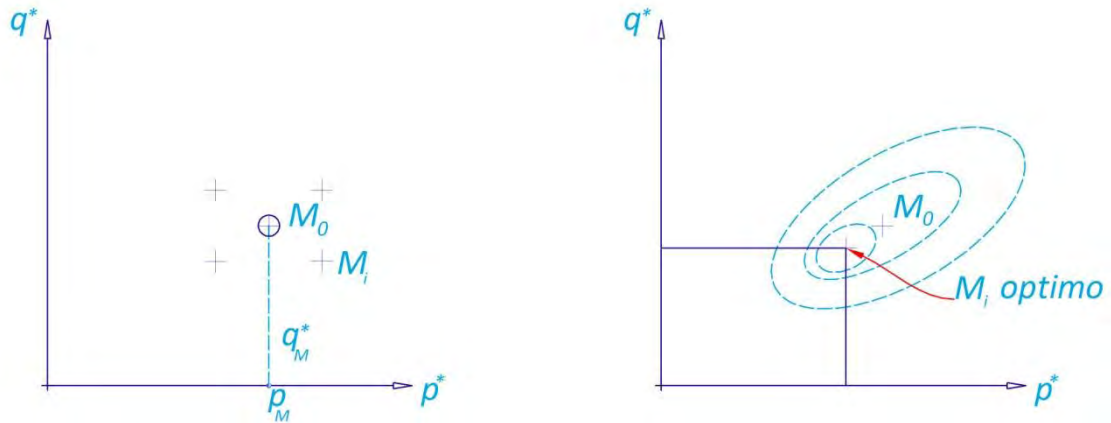
O bien

$E = E(VR, p_c^*, \lambda, M)$ en el caso de P

VR, son los resultados de los ensayos.

4.3.3.3 Minimizar el error

Hay que hacer mínimo el error cuadrático que es una función que depende de cuatro parámetros.



En el Anejo 4, se indica el procedimiento para ajustar los parámetros para obtener la curva que da el error cuadrático mínimo, a partir de unos valores aproximados de esos parámetros.

4.4 OTROS: CARGA ISÓTROPA DE COLAPSO DE LOS PIROCLASTOS VOLCÁNICOS EN FUNCIÓN DE LA MACROPOROSIDAD

4.4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se propone un modelo de ajuste para la obtención de la carga isótropa de colapso en función de la densidad seca de estos materiales. El modelo se deduce en primer lugar de forma teórica, considerando la macroestructura de poros de los materiales, y a continuación se ajusta a los resultados empíricos para obtener el ajuste de los parámetros que intervienen en el mismo.

Este modelo, desarrollado dentro de los trabajos de esta tesis doctoral, se publicó con diferente extensión en dos congresos del año 2010 (Serrano et al, 2010a y 2010b).

4.4.2 MACROESTRUCTURA DE POROS

Se pueden distinguir principalmente dos macroestructuras básicas de poros:

- a) Estructura reticular
- b) Estructura vacuolar (Fig.4.21a y b)

La reticular corresponde a la estructura de poros de una roca constituida por un agregado de partículas, y la vacuolar a la de los poros de una roca en la que todos sus poros son vacuolas, que en general, no tienen conexión entre ellos (a diferencia de la estructura reticular).

En general las rocas y, en especial, las rocas macroporosas volcánicas tienen poros de ambos tipos. En este caso se dice que tienen una estructura de poros mixta (Fig.4.21c), y la porosidad total es $n = n_R + n_V$, siendo n_R y n_V las porosidades reticular y vacuolar, respectivamente.

Pueden darse casos y estructuras más complejas de poros en las que los granos estén formados a su vez por aglomerados de microgranos que, a su vez, tienen microvacuolas.

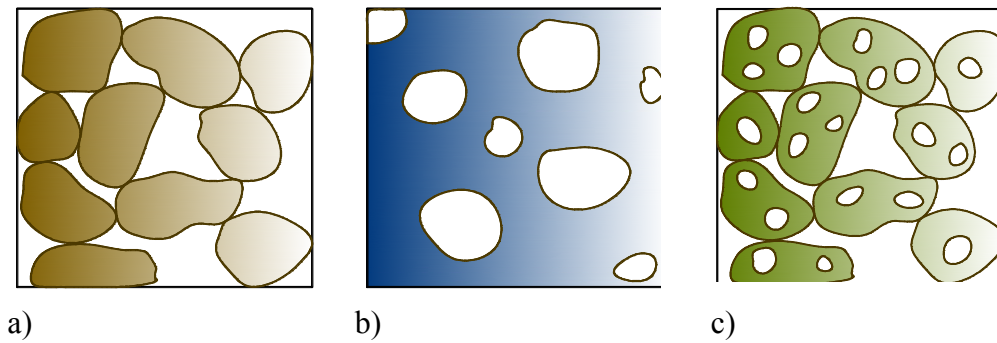


Fig.4.21: Estructuras de poros: a) Reticular; b) Vacuolar; c) Mixta.

4.4.3 CARGA ISÓTROPICA DE COLAPSO

4.4.3.1 Rocas con estructura de poros reticular

Sea una esfera de roca macroporosa, con una estructura reticular de poros, a la que se somete a una presión externa isótropa, p (Fig.4.22a).

La cantidad de trabajo suministrado a la esfera por la presión externa p es $T_e = p\Delta V$.

ΔV es el cambio total de volumen que experimenta la probeta, que se puede descomponer en dos sumandos, correspondientes a la roca intacta (ΔV_i) y a los poros reticulados (ΔV_R):

$$\Delta V = \Delta V_i + \Delta V_R$$

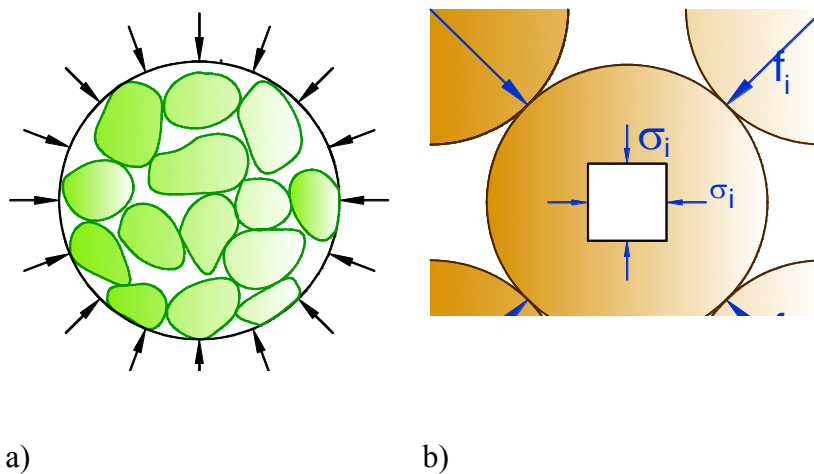


Fig.4.22: Ensayo de compresión isótropa (a); Detalle de una partícula con las fuerzas de contacto (b). Estructura reticular.

El trabajo T_i realizado por las tensiones internas en la roca intacta es:

$$T_i = \sigma_i \Delta V_i$$

donde σ_i es una tensión isotrópica media a la que está sometida la roca intacta por efecto de la presión isotrópica exterior, p .

Ambos trabajos han de ser iguales:

$$T_i = T_e \Rightarrow \sigma_i \Delta V_i = p \Delta V \quad \text{luego:}$$

$$\sigma_i = p \frac{\Delta V}{\Delta V_i}$$

Admitiendo que $\Delta V_i / V_i = \Delta V / V$ (deformación volumétrica de la roca intacta igual a la total), resulta:

$$\sigma_i = p \frac{V}{V_i} = p \frac{1}{1 - n_R}$$

La tensión isotrópica media, σ_i , a la que están sometidas las partículas de roca intacta las ha transmitido a través de las fuerzas F_j que se ejercen en los contactos con las otras partículas conectadas con ellas (Fig.4.22b). Cada F_j se puede descomponer en una fuerza normal, P_j , una fuerza tangencial, Q_j , y un momento flector, M_j (Fig.4.23).

Se definen unos coeficientes λ y μ , tal que:

$$Q_j = \lambda_j P_j \quad ; \quad M_j = \mu_j D P_j$$

siendo D el tamaño de la partícula.

P está desplazada del centro del contacto la distancia μD .

Si N es el número de coordinación (número de contactos que tiene una partícula):

$$NP = S \sigma_i$$

siendo P la magnitud media de las componentes normales de las fuerzas de los contactos. Luego:

$$P = \frac{S}{N} \sigma_i = \frac{S}{N} \left(\frac{p}{1 - n_R} \right) \quad (1)$$

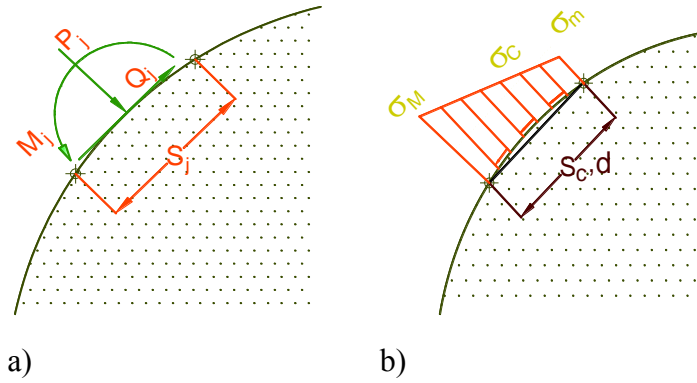


Fig.4.23: Esquema de fuerzas en un contacto (a); Tensión en el contacto. (b).

Si λ y μ son los coeficientes medios:

$$\lambda P = Q \quad \text{y} \quad \mu DP = M$$

siendo Q y P la fuerza transversal y normal y M el momento flector medio en el contacto.

En el contacto entre partículas habrá una tensión media, σ_c , definida por:

$$\sigma_c = \frac{P}{S_c} = \frac{S}{S_c N} \left(\frac{P}{1 - n_R} \right) = \frac{P}{w(1 - n_R)} \quad (2)$$

siendo S_c el área de contacto (Fig.4.23b) y w un coeficiente de soldadura definido por:

$$w = \frac{NS_c}{S}$$

Las tensiones normales máximas y mínimas son:

$$\sigma_{M,m} = \frac{P}{S_c} \left(1 \pm \frac{\mu D}{d} \right) = \sigma_c \left(1 \pm \mu \frac{D}{d} \right) \quad (3)$$

siendo d el diámetro del contacto.

La tensión cortante máxima en el contacto será:

$$\tau_M = \frac{3}{2} \lambda \sigma_c \quad (4)$$

Luego según (2), (3) y (4):

$$\sigma_{M,m} = \left(1 \pm \mu \frac{D}{d}\right) \frac{p}{w(1-n_R)} \quad \text{y} \quad \tau_M = \frac{3}{2} \lambda \frac{p}{w(1-n_R)}$$

El contacto se puede romper por compresión, tracción, esfuerzo cortante, o por una combinación de estos tipos de solicitaciones. Simplificando se puede decir que el contacto se romperá cuando:

$$\sigma_{cri} = (K_{cri}) \frac{p}{w(1-n_R)} \quad \text{siendo } \sigma_{cri} \text{ la tensión, del tipo que sea, que produce la rotura.}$$

K_{cri} es una función de λ y μ :

$$K_{cri} = K_{cri}(\lambda, \mu)$$

Los coeficientes λ y μ dependen de la imbricación de las partículas. Cuando ésta es elevada hay muchos contactos, y los esfuerzos cortantes y los momentos en dichos contactos son muy pequeños en relación a los componentes normales. Contrariamente, en las estructuras muy abiertas con pocos contactos y con muchos más grados de libertad, los momentos y esfuerzos cortantes aumentan relativamente.

Todos estos razonamientos sugieren una relación del tipo:

$$K_{cri} = K(n) \quad \text{o mejor aún} \quad K_{cri} = K\left(\frac{n}{1-n}\right)$$

La función más sencilla que se puede adoptar es:

$$K_{cri} = \frac{1}{a_R} \left(\frac{n}{1-n}\right)^{\alpha_R}$$

Finalmente, cuando la presión exterior, p , es tan grande que se alcanza la σ_{cri} , se produce el colapso de la estructura macroporosa. Así:

$$p_{ci} = \sigma_{cri} a_R w (1-n_R) \left(\frac{1-n_R}{n_R}\right)^{\alpha_R} \quad (5)$$

Si el peso específico de la roca intacta es G y el peso específico de la roca con poros es γ , se tiene que:

$$\gamma = (1-n_R)G$$

luego la ecuación (5) se puede poner en la forma:

$$p_{ci} = \left(\sigma_{cri} \frac{a_R w}{G} \right) \gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^{\alpha_R} = L_R \gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^{\alpha_R} \quad (6)$$

siendo $L_R = \sigma_{cri} \frac{a_R w}{G}$

LR es un parámetro con dimensiones de longitud que depende de:

- la resistencia crítica, σ_{cri} ;
- el coeficiente de soldadura, w ;
- la imbricación, a_R

4.4.3.2 Rocas con estructuras de poros vacuolares

Como se ha visto anteriormente, cuando se somete una roca macroporosa a una presión exterior isótropa, p (Fig. 4), experimenta una tensión isótropa, σ_i :

$$\sigma_i = p \left(\frac{1}{1 - n_v} \right) \quad \text{siendo } n_v \text{ la porosidad vacuolar en este caso.}$$

La tensión σ_i es una tensión media.

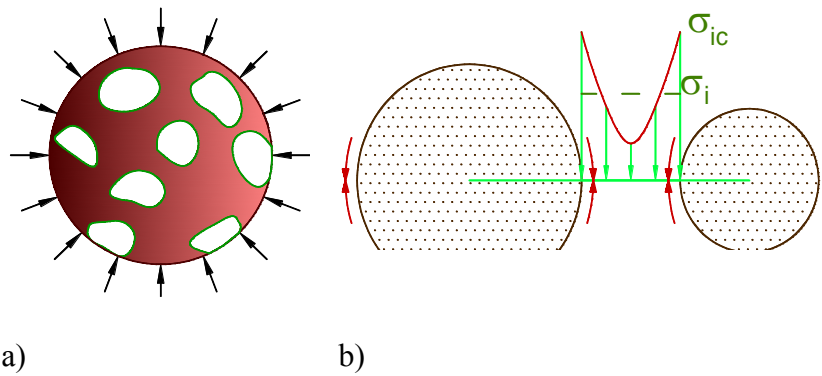


Fig.4.24: Ensayo de compresión isótropa (a); Detalle de la tensión intervacuolar (b). Estruct. vacuolar.

Existen concentraciones de tensiones circunferenciales en los bordes de las vacuolas (Fig.4.24), que serán mayores cuanto más cerca estén las vacuolas y cuanto más grandes sean éstas en relación al espacio intervacuolar. Las tensiones de pico, σ_{ic} , en

el borde serán:

$$\sigma_{ic} = k\sigma_i$$

↓

$$\sigma_{ic} = k \left(\frac{p}{1 - n_v} \right)$$

siendo k un factor de concentración.

La roca colapsará cuando σ_{ic} alcance un cierto valor crítico σ_{cri} , que se piensa está relacionado con la resistencia a compresión simple de la roca intacta.

La función k debe verificar que para porosidades muy bajas la presión de colapso tiende a infinito y para porosidades cercanas a la unidad dicha presión es ínfima.

La función más sencilla que cumple las condiciones límite es del tipo:

$$k = \frac{1}{a_v} \left(\frac{n_v}{1 - n_v} \right)^{\alpha_v}$$

Con lo que la carga de colapso isótropa de rocas con estructura de poros vacuolar toma la forma:

$$p_{ci} = a_v (1 - n_v) \left(\frac{1 - n_v}{n_v} \right)^{\alpha_v} \sigma_{cri}, \text{ es decir,}$$

$$p_{ci} = a_v \frac{\sigma_{cri}}{G} \gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^{\alpha_v} = a_v \gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^{\alpha_v} \quad (7)$$

siendo $L_v = \sigma_{cri} \frac{a_v}{G}$

L_v y α_v dependen de:

- otra resistencia intrínseca de la roca intacta, σ_{cri} (ligada a la resistencia a compresión simple);
- el tamaño y proximidad de los poros;
- la forma y distribución de los poros

4.4.3.3 Conclusión práctica

Las ecuaciones (6) y (7) tienen la misma estructura. Sólo se diferencian en los valores de los parámetros L y α .

Es muy difícil o más bien imposible determinar por separado los parámetros σ_{cri} , w , a_R y a_V . Sin embargo, es relativamente fácil determinar los parámetros L_R y L_V , así como los exponentes α_R y α_V , mediante ensayos de colapso isótropo ajustando las ecuaciones (6) y (7) a ensayos con una misma roca y varias densidades.

En general, no se tendrá una estructura clara de tipo reticular o vacuolar, sino una estructura mixta. Por ello se propone una ecuación única para la carga isótropa de colapso de las rocas macroporosas:

$$p_{ci} = L\gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^\alpha \quad (8)$$

G , L y α a determinar con ensayos.

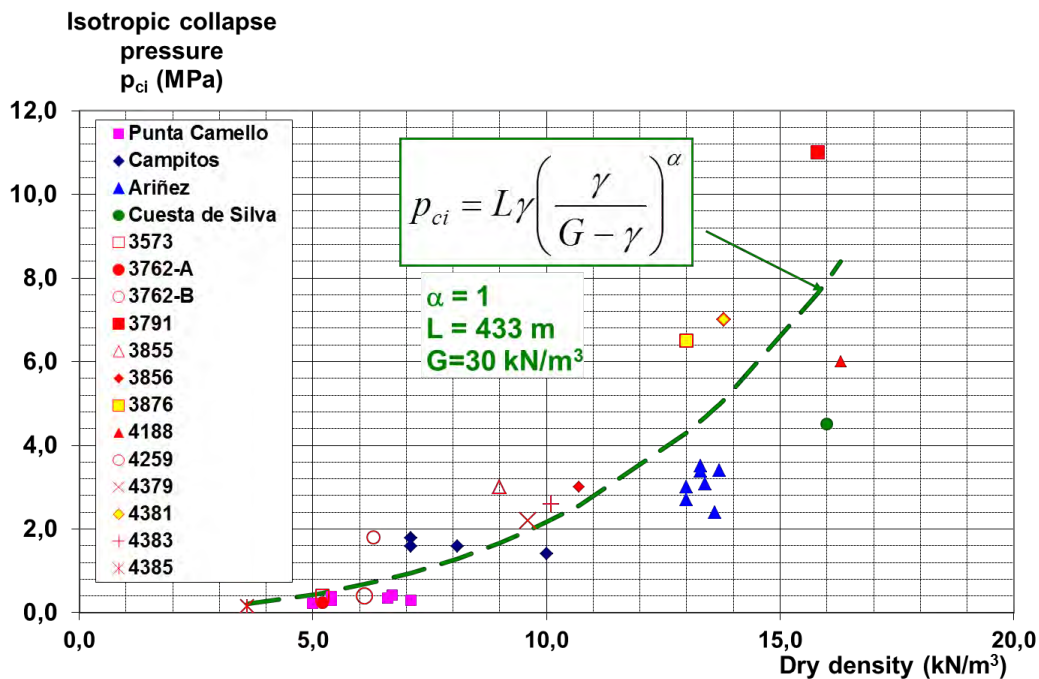


Fig.4.25: Resultados con muestras de piroclastos canarios.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO EXPERIMENTAL REALIZADO



ÍNDICE

5.1	INTRODUCCIÓN	1-3
5.2	ENSAYOS REALIZADOS.....	2-5
5.2.1	Muestras ensayadas	2-5
5.2.1.1	Muestras Artificiales.....	2-5
5.2.1.2	Muestras reales de piroclastos	2-6
5.2.2	Tipos de ensayos	2-6
5.2.2.1	Resumen de los ensayos realizados	2-6
5.2.2.2	Ensayos de Compresión Simple	2-7
5.2.2.3	Ensayos de Compresión Isótropa (CI)	2-7
5.2.2.4	Ensayos Triaxiales especiales: “Triaxial Isotropic Shear” (TIS)....	2-8
5.2.3	Características de los materiales artificiales.....	2-12
5.3	MUESTRAS ARTIFICIALES	3-13
5.3.1	Tabla resumen	3-15
5.4	ENSAYOS CON PIROCLASTOS REALES	4-16
5.4.1	Ensayos de caracterización.....	4-17
5.4.1.1	Análisis de la Macroporosidad.....	4-18
5.4.1.2	Propiedades químicas	4-21
5.4.1.3	Propiedades mineralógicas	4-23
5.4.1.4	Ensayos de resistencia y deformabilidad	4-24
5.4.2	Clasificación geotécnica de los piroclastos de baja densidad	4-28
5.4.2.1	Introducción: Clasificación previa.....	4-28
5.4.2.2	Nueva clasificación propuesta	4-30
5.5	APÉNDICE: PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS ARTIFICIALES Y REALES	5-36
5.5.1	Preparación de las muestras	5-36
5.5.1.1	Muestras Artificiales.....	5-36
5.5.1.2	Muestras reales de piroclastos	5-37
5.5.2	Etapas realizadas en la búsqueda del ‘piroclastos ideal’	5-39
5.5.2.1	Conglomerante.....	5-39

5.5.2.2	Probetas BCAP y BCP.....	5-42
---------	--------------------------	------

5.1 INTRODUCCIÓN

Esta tesis doctoral es una continuación de los estudios que se vienen desarrollando en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX durante los últimos años en relación a las características geotécnicas de las rocas volcánicas de baja densidad, con el fin de desarrollar las leyes intrínsecas de resistencia que los rigen. El principal objetivo de dichos trabajos, y de éste como continuación de los mismos, es el de buscar unas relaciones que permitan obtener la resistencia de los piroclastos en función de unos pocos parámetros sencillos de determinar. Para ello se llevaron a cabo estudios basados en una extensa campaña de ensayos de laboratorio, realizados con probetas talladas a partir de bloques de piroclastos extraídos de diferentes puntos de las islas Canarias.

Como resultado de aquellos trabajos (Serrano, 2007 y CEDEX, 2007) se obtuvieron algunas correlaciones, de gran interés ingenieril, entre diferentes parámetros de los piroclastos (Ver capítulo 3). Tales correlaciones fueron:

- Densidad–Resistencia a compresión simple.
- Densidad-Módulo de elasticidad.
- Densidad-Desviador de rotura.
- Curvas de resistencia de Hoek y Brown.
- Densidad-Resistencia a la compresión simple (presión de colapso).
- Resistencia a compresión simple-Resistencia a compresión isotrópica (presión de colapso).
- Resistencia a compresión simple-Composición geoquímica y mineralógica.

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados hasta el año 2007 presentaban una dispersión importante y, además, requerían de la realización de un mayor número de resultados de ensayos para poder precisar más dichas correlaciones y continuar avanzando en el conocimiento de las propiedades geotécnicas de estos materiales tan peculiares.

Debido en parte a la dificultad de tallado de probetas de calidad con estos materiales y, en parte, a la heterogeneidad de los mismos, se planteó la búsqueda de un piroclasto “artificial”, fabricado en el laboratorio, cuyo comportamiento geotécnico pudiera ser parecido a los piroclastos reales, y con el que se pudieran fabricar una batería de probetas de mayor calidad y homogeneidad a las que someter a diferentes estados de carga, cuyos resultados pudieran presentar una menor dispersión y facilitar la búsqueda de leyes de resistencia (resistencia de los “piroclastos ideales”).

Se realizaron numerosas pruebas con diferentes mezclas de materiales (fundamentalmente, cemento, bentonita, arlita y porexpan, como se detalla

posteriormente) hasta lograr definir un material de características resistentes y deformacionales similares a las de los piroclastos de baja densidad, que se denominó “piroclasto ideal”. Se realizaron numerosas probetas de este material, siguiendo un proceso de fabricación análogo en todas ellas, con el fin de que fueran lo más homogéneas posible, y se realizaron numerosos ensayos de resistencia con las mismas. Todos estos ensayos se realizaron previamente a los de las muestras reales, que se ensayaron posteriormente, y fueron de gran utilidad para poner a punto las técnicas de ensayos. No obstante, los ajustes de las leyes de resistencia planteadas en el Capítulo 4 fueron mejores con los piroclastos reales ensayados que con dichos “piroclastos ideales”.

Este capítulo se divide en tres partes:

En la primera parte se detalla la metodología de los ensayos realizados en esta investigación, así como también los diferentes pasos para la obtención de probetas tanto de muestras artificiales como reales. Al final, se presentan algunas características de los materiales artificiales utilizados para la búsqueda del „piroclasto ideal’.

La segunda parte es un resumen de todas las etapas que se llevaron a cabo para encontrar un material cuyo comportamiento geotécnico fuera similar al de los piroclastos reales, que van desde la búsqueda del conglomerante hasta la composición de ese „piroclasto ideal’.

Los materiales reales (piroclastos), se estudian en la tercera parte de este capítulo. Aquí se resumen los tipos de ensayos realizados sobre estos materiales y la procedencia de los mismos.

5.2 ENSAYOS REALIZADOS

5.2.1 Muestras ensayadas

5.2.1.1 Muestras Artificiales

En la fabricación de las muestras artificiales se utilizaron los siguientes componentes: cemento, bentonita, arlita y porexpan. Las características de estos materiales se exponen en el apartado 5.2.3.

Se intentó obtener dos tipos de muestras artificiales (Serrano et al, 2007 y 2010), por un lado aquellas muestras que representaran a los piroclastos con porosidad reticular, es decir, aquellos en los que la porosidad es de tipo „inter-partículas’ donde la estructura de la roca está constituida por un agregado de partículas unidas unas con otras, y por otro, aquellas que representaran los piroclastos con porosidad „intra-partículas’ donde no hay conexión entre los poros, es decir, porosidad vacuolar (Fig. 5.1).

La forma de realizar las probetas se describe en el Apéndice 5.5.

Para fabricar piroclastos con porosidad del tipo reticular (Fig. 5.1), se realizaron probetas (Grupo BCAP, Fig. 5.2) con arlita y porexpan (para simular la estructura de dichos materiales), con diferentes dosificaciones (Apéndice 5.5) hasta encontrar la composición adecuada para que los materiales artificiales tuvieran un comportamiento similar a las muestras reales. Para simular aquellos piroclastos con porosidad vacuolar (Grupo BCP, Fig. 5.2) se realizaron probetas con cemento y porexpan también con diferentes proporciones hasta conseguir la dosificación correcta.

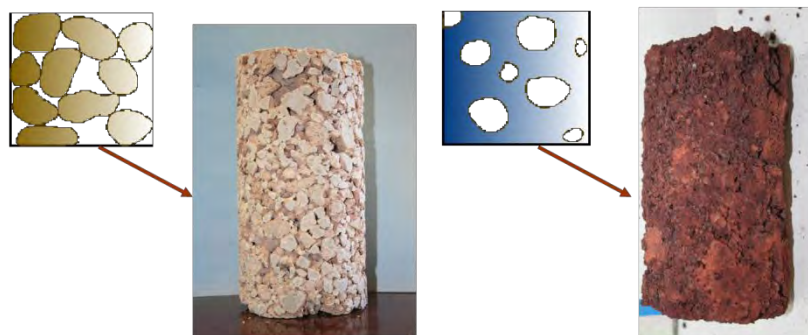


Fig. 5.1: Izqda.: Piroclastos con porosidad reticular (Pómez). Dcha.: Piroclastos con porosidad vacuolar (Lapillis).



Fig. 5.2: Izqda.: Probeta BCAP con estructura reticular. Dcha.: Probeta BCP con estructura vacuolar.

5.2.1.2 Muestras reales de piroclastos

Las muestras de piroclastos reales utilizadas para este trabajo fueron extraídas de bloques procedentes de las Islas del Hierro, Tenerife y Las Palmas (Tabla 5.6). Dichos bloques se envolvieron, en el mismo momento de la extracción, con parafina para preservar la humedad natural del material. Estos bloques parafinados se introducían en cajas de cartón resistentes y se rellenaban de porexpan para evitar que los golpes recibidos durante el transporte pudiera dañar la estructura del material.

Al principio del estudio se comenzó tallando muestras de los bloques, sin parafina, con una máquina sacatestigos manual y en húmedo. Sin embargo, debido a la heterogeneidad del material, en muchos casos el material perdía su consistencia y las partículas se reducían a un material fino. Por lo que a continuación se modificó la técnica.

En el Apéndice 5.5 se describe el procedimiento utilizado en esta investigación.

5.2.2 Tipos de ensayos

5.2.2.1 Resumen de los ensayos realizados

En la Tabla 5.1 se resumen los ensayos llevados a cabo a lo largo de toda la investigación, así como el nº de cada uno de ellos, tanto de las muestras artificiales, fabricadas en el laboratorio, como de las muestras naturales.

Tabla 5.1: Resumen de la cantidad de ensayos llevados a cabo durante los 4 años de investigación, tanto en muestras artificiales como en muestras reales.

Tipo de Ensayos	Ensayos	Nº ensayos	
		(Muestras artificiales)	(muestras reales)
Identificación	Peso específico de las partículas	-	24
	Difracción y Fluorescencia	-	24
	Carbonatos	-	24
	Sulfatos	-	24
	Materia Orgánica	-	24
	Humedad	-	24
Resistencia	Compresión Simple	200	42
	Compresión Isótropa	168	105
	Triaxial (TIS)	100	108

A continuación se describen los ensayos de resistencia que se llevaron a cabo durante la presente investigación.

5.2.2.2 Ensayos de Compresión Simple

Con objetivo de estudiar la resistencia del material en condiciones de no confinamiento lateral se realizaron ensayos de resistencia a compresión simple en probetas con una altura variable entre 10 y 13 cm y un diámetro de 7cm.

5.2.2.3 Ensayos de Compresión Isótropa (CI)

En los trabajos llevados a cabo por Serrano et al en el año 2007 y realizados con estos tipos de materiales uno de los problemas encontrados, como se ha comentado anteriormente, fue que debido a la gran irregularidad de las paredes de las probetas con numerosos entrantes y salientes en todo el perímetro exterior se producía con mucha frecuencia la rotura de las membranas y, por tanto, la interrupción de los ensayos. Para solventar este problema se probaron la técnica de refrentado con escayola y colocación de una membrana.

En este estudio la forma en la que se llevaron a cabo estos ensayos fue la siguiente:

Una vez tallada la probeta se rodeaba lateralmente con un plástico tipo hule (Foto 5.1) y sobre éste 2 ó 3 membranas impermeables, con el fin de tratar de evitar la rotura de estas con la consiguiente entrada de agua de la célula a la muestra, y se

introducía en la célula triaxial, donde se sometía a la probeta a una presión isotropa hasta colapso de la estructura (Fig. 5.3).



Foto 5.1: En estas fotos se observan las membranas impermeables y el hule, utilizados para los ensayos CI y TIS.

El hule y las membranas producen una cierta rigidización de las muestras, pero no provocan una alteración significativa los resultados de los ensayos, sin embargo, gracias a ellos fue posible obtener un número mayor de resultados.

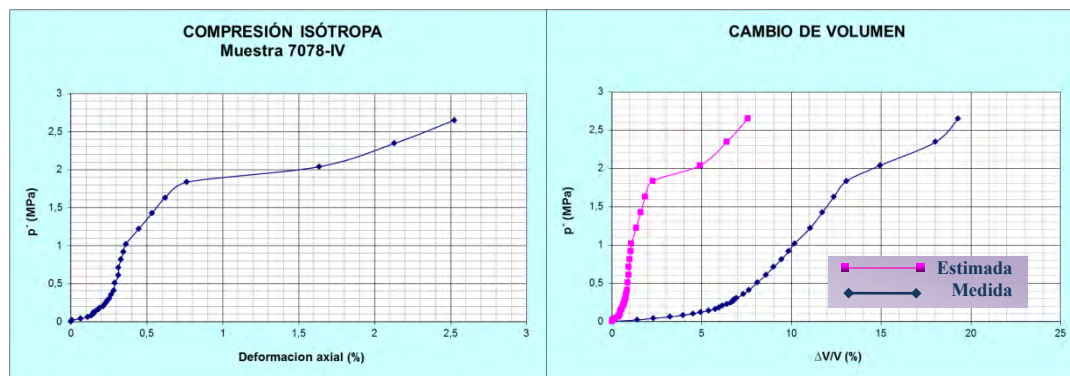


Fig. 5.3: Resultados del ensayo de compresión isotropa. Izqda.: Curva presión isotropa versus deformación. En esta curva se observa como a una presión de 1.8 MPa se produce el colapso de la estructura, el cual se traduce en un aumento brusco de la deformación. Dcha.: Curvas presión isotropa versus cambio de volumen, la curva rosa es la medida estimada y la azul la medida (ver ensayo TIS).

5.2.2.4 Ensayos Triaxiales especiales: “Triaxial Isotropic Shear” (TIS)

El procedimiento del ensayo TIS es el siguiente:

Se realizaron ensayos triaxiales especiales, denominados ensayos TIS (abreviatura de “*triaxial isotropic shear*”), sobre las probetas secas y sin someterlas a saturación

previa. La forma de realización de estos ensayos fue la siguiente:

Basándose en los valores de la compresión simple y de la compresión isotropa se elegían los valores de la compresión isotropa de confinamiento para los ensayos TIS la cual tenía un valor inferior a la presión isotropa de colapso. La probeta estaba seca, debido a que se metían en estufa 48H, por lo que no existen presiones intersticiales. A continuación se le aplicaba el desviador hasta rotura o hasta alcanzar un 30% de deformación vertical (Fig. 5.4).

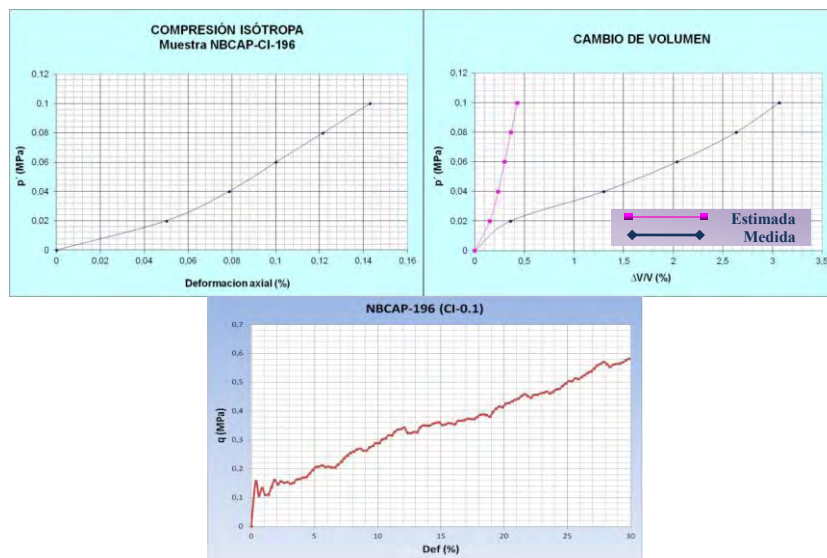


Fig. 5.4: Resultado del ensayo TIS. Las gráficas de p -def. y p -cambio de volumen, corresponden a la parte de compresión isotropa; una vez alcanzado la presión de consolidación, en este caso es 0.1MPa, se prosigue con el desviador hasta rotura al 30%.

5.2.2.4.1 Descripción del equipo

En estos ensayos se ha medido el cambio de volumen mediante un sistema que utiliza un software de control en un microcomputador para hacer funcionar hasta cuatro fuentes hidráulicas de presión (controladores digitales de presión-volumen, o DPVC) conectados a la célula triaxial.

Estos DPVC son unos actuadores hidráulicos controlados por microprocesador para la regulación en lazo cerrado, y la medida de la presión y cambio de volumen de agua, en el ensayo triaxial. Con una capacidad de 250 cm³, permiten medir el cambio de volumen con una resolución de 1mm (Fig. 5.5 y Fig. 5.6).



Fig. 5.5: Fotografía de los controladores digitales de presión-volumen.

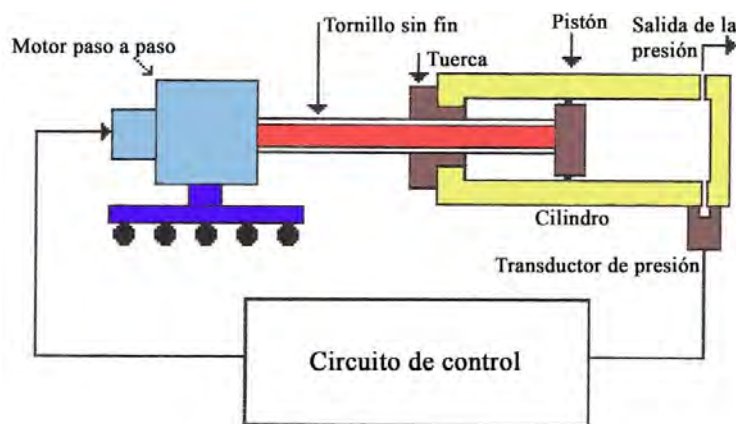


Fig. 5.6: Esquema simplificado de un controlador presión-volumen (DPVC).

Un motor paso a paso controlado por el computador mueve rectilíneamente, mediante una caja de engranajes, un tornillo sin fin y un pistón unido a él, a través de una tuerca unida a un cilindro de presión. Dicho pistón al moverse en el interior del cilindro presuriza el agua (normalmente desairada) que contiene. La presión se mide mediante un transductor conectado a la base del cilindro. El cambio de volumen se mide por conteo de los pasos del motor. Los DPVC se comunican con el computador mediante señales binarias y pueden ejecutar diversos algoritmos de control (por ejemplo mantener una presión constante, un volumen constante, un incremento de presión en rampa, etc.).

Por otra parte, se ha estimado el cambio de volumen, así mismo, en función de la deformación vertical, mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta V}{V} (\%) = 3 * \varepsilon_v (\%)$$

siendo ϵ_v la deformación vertical de la probeta.

Por este motivo, en las gráficas de CI aparecen dos curvas, una correspondiente a los datos medidos con la célula de cambio de volumen y la otra a los datos estimados en función de la deformación vertical medida (Fig. 5.4).

Como puede verse en las Fig. 5.3 y Fig. 5.4, los valores medidos mediante la máquina de cambio de volumen presentan una discordancia con los calculados de forma estimada, pero en muchos casos esta curva ayudó a obtener el valor preciso de la presión de fluencia cuando era difícil de ver en la curva de tensión-deformación, como puede verse en el Anejo 1.

5.2.3 Características de los materiales artificiales

Los materiales utilizados para construir las probetas artificiales se exponen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Materiales artificiales.

Material	Clasificación
Arlita Nueva	Arexpan 3-10 mm
Cemento Nuevo	Cemento Portland Valderrivas CEM II/B-M (V-L) 32.5 R
Porexpan	Empresa Cypsa Perla gruesa (5 kg / 0,5 m³) Perla fina (10 kg / 0,5 m³)
Bentonita	Bentonita Sódica GADOR

La Tabla 5.3 se recoge las propiedades de la Arlita utilizada en la construcción de las muestras artificiales Tipo BCAP.

Tabla 5.3: Propiedades de la Arlita utilizada en la fabricación de las probetas artificiales.

ARLITA	
Propiedades físicas	
Reacción al fuego	A-1
Forma de la partícula	Redonda
Contenido de agua en % en peso	27±3%
Resistencia a la rotura	1,7±2N/mm²
Porcentaje de partículas machacadas, habitual	9% (EN 933-5)
Densidad	
Densidad a granel	350±50kg/m³

Tamaño de las probetas en los ensayos de Triaxiales (tanto CI como TIS) se puede ver en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Tamaño de la probeta para ensayos Triaxiales.

DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)
7±0.5	13,5±0,5

5.3 MUESTRAS ARTIFICIALES

Como se indicó anteriormente, con el fin de encontrar un material con un comportamiento similar a los materiales volcánicos de baja densidad, se realizaron varias pruebas variando la dosificación y composición de los materiales artificiales usados.

Lo primero que se buscó fue la dosificación adecuada para el conglomerante, y para esto se llevaron a cabo ensayos de compresión simple en probetas de 3.5 cm de diámetro y una altura de 10cm con el fin de poder comparar los resultados con la resistencia a compresión simple de los piroclastos reales (Foto 5.2). Estos ensayos se llevaron a cabo en diferentes probetas cuya composición variaba a medida que se iban ajustando los valores de la compresión simple. Se realizaron pruebas con escayola y agua, luego, al observar que estas probetas tenían valores muy bajos de CSP, se cambió la escayola por cemento (probetas CMT). Las probetas CMT tenían un problema debido a la exudación del cemento, esa pérdida de agua se traducían en una disminución de la altura de las probetas y por esta razón se introdujo bentonita en la mezcla (probetas CB). A partir de este momento se fueron variando las proporciones de bentonita-cemento hasta dar con la dosificación adecuada.



Foto 5.2: Probeta de cemento y bentonita. Rotura a compresión simple.

Una vez encontrado el conglomerante (CB), el siguiente paso fue buscar la dosificación adecuada de porexpan y arlita para las muestras BCAP y de porexpan para las BCP, que produjera el colapso de la estructura bajo compresión isotrópica (Fig. 5.7), con unos valores de presión y deformación que tuvieran un mismo orden de magnitud que en los piroclastos reales.

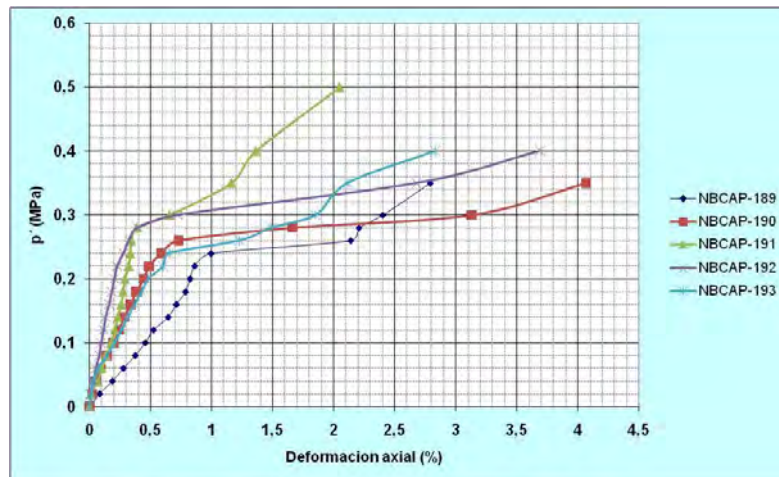


Fig. 5.7: Ensayo de Compresión Isótropa en muestras NBCAP.

Cuando se obtuvo el „piroclasto ideal’ el siguiente paso fue realizar ensayos TIS a fin de alcanzar un gran número de ensayos y así poder obtener un mejor ajuste de la curva de colapso.

En la Fig. 5.8 se muestra los resultados de uno de los grupos NBCAP para diferentes valores de confinamiento.

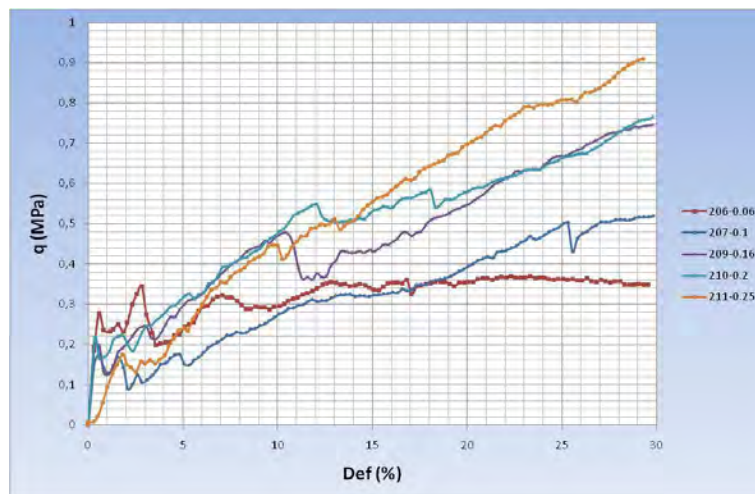


Fig. 5.8: Resultado de los ensayo TIS llevados a cabo en el grupo NBCAP-XLVI.

En el Apéndice 5.5 se describen de forma más detallada las diferentes etapas en dicha búsqueda.

La Fig. 5.9 muestra los resultados de los diferentes ensayos llevados a cabo en las muestras BCAP en variables de Cambridge, y mostrando los valores mínimos,

máximo y medios de los ensayo junto con sus densidades.

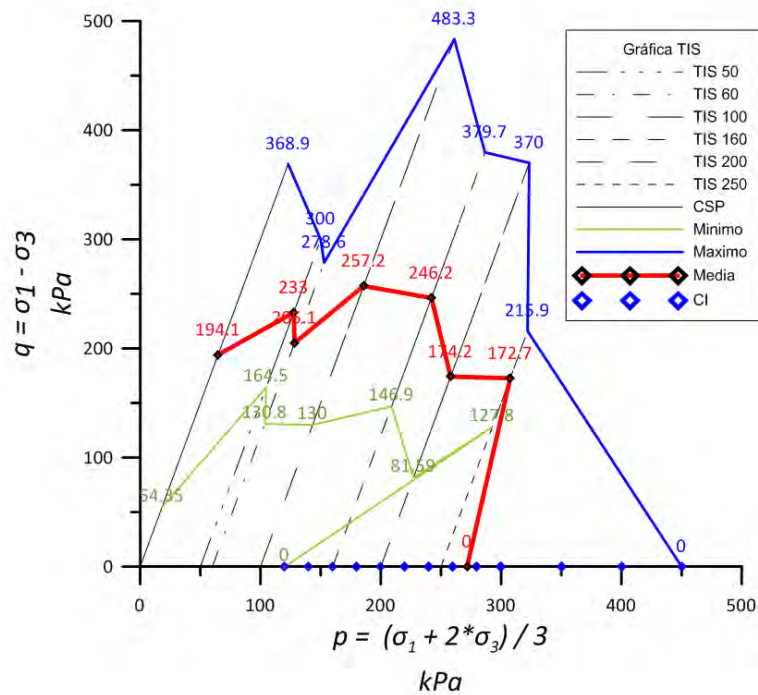


Fig. 5.9: Resumen de los resultados de los ensayos en muestras artificiales.

5.3.1 Tabla resumen

A continuación, se presenta una tabla con la cantidad de ensayos llevados a cabo durante la investigación.

Tabla 5.5: Resumen de números de ensayos llevados a cabo en muestras artificiales.

Ensayos	Cantidad de ensayos	
	Conglomerante	Piroclasto Ideal
CSP	55	145
CI	-	168
TIS	-	100

5.4 ENSAYOS CON PIROCLASTOS REALES

Para este estudio se recopilaban por un lado, datos obtenidos en el año 2007 (Serrano et al., 2007) y en el año 1976 (Uriel et al. 1976, Serrano, 1976); y por otro lado, se realizó una nueva campaña de ensayos, constituida por 24 (Tabla 5.6) muestras traídas de diferentes partes de las Islas Canarias.

Paralelamente se recopilaban los resultados obtenidos en diferentes estudios llevados a cabo en varios países sobre rocas piroclásticas, citadas y descritas en el Capítulo 3. Aunque se trata en su mayoría de un material con una génesis distinta a la mayoría de los materiales utilizados para esta investigación, se realizaron los ajustes para comprobar si tanto los piroclastos de caída como las coladas piroclásticas tienen una curva de colapso con una misma forma.

Tabla 5.6: Recopilación de las nuevas muestras, su litotipo y procedencia.

Nº de campo	Litotipo	Fecha recepc.	Fecha petición	Nº muestra	Situación	Tipo de muestra
PR-1	LPT	2011	04/10/2011	6630	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-2 (A)	LPT	2011	04/10/2011	6631	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-2 (B)	LPT	2011	04/10/2011	6632	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-3	PZT	2011	04/10/2011	6633	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-4	PZT	2011	04/10/2011	6634	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-5(A)	PZT	2011	04/10/2011	6635	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-5(B)	PZT	2011	04/10/2011	6636	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-6	CBT	2011	04/10/2011	6637	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-7	PZT	2011	04/10/2011	6638	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-8	LPT	2012	08/05/2012	7066	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-9	LPT	2012	08/05/2012	7067	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-10	LPT	2012	08/05/2012	7068	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-11	LPT	2012	08/05/2012	7069	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-12	LPT	2012	08/05/2012	7070	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-13	LPT	2012	08/05/2012	7071	El Hierro	Parafinada(1 bloque)

Nº de campo	Litotipo	Fecha recepc.	Fecha petición	Nº muestra	Situación	Tipo de muestra
PR-14	LPT	2012	08/05/2012	7072	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-15	LPT	2012	08/05/2012	7073	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-16	LPT	2012	08/05/2012	7074	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-17	LPT	2012	08/05/2012	7075	Tenerife	Parafinada(1 bloque)
PR-18	LPT	2012	08/05/2012	7076	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-19	LPT	2012	08/05/2012	7077	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-20	LPT	2012	08/05/2012	7078	El Hierro	Parafinada(1 bloque)
PR-21	LPT	2012	08/05/2012	7079	La Palma	Parafinada(1 bloque)
PR-22	LPT	2012	08/05/2012	7080	La Palma	Parafinada(1 bloque)

5.4.1 Ensayos de caracterización

Por un lado, se realizaron ensayos para obtener la resistencia de estos materiales. Dichos ensayos fueron los mismos que los efectuados en las muestras artificiales con el fin de encontrar la ley de resistencia de dichos materiales.

Los ensayos fueron los siguientes:

- Compresión Simple.
- Ensayos Triaxiales: Compresión Isótropa y TIS (Apartado 5.3.2.2).
- Algunos ensayos Brasileños.

Paralelamente, se llevaron a cabo diferentes ensayos para conocer las propiedades químicas y mineralógicas de las muestras, así como también para saber sus porosidades:

- Peso Específico de las partículas mediante el Picnómetro (Anejo 1).
- Determinación del contenido en carbonatos, sulfatos solubles, materia orgánica y pérdidas por calcinación.(Anejo 1)
- Contenido de óxidos y elementos mayoritarios en muestra, determinado mediante fluorescencia de rayos x.(Anejo 1)
- Análisis de la macroporosidad mediante un microscopio de mano (Celestron) (Anejo 2).

En la Tabla 5.7 se recogen los diferentes ensayos llevados a cabo en las muestras reales.

Tabla 5.7: Ensayos realizados en las diferentes muestras.

Tipos de ensayos.
Difracción de Rayos-X
Fluorescencia de Rayos-X
Carbonatos
Sulfatos
Materia Orgánica
Humedad
Peso específico de las partículas
Compresión simple
Compresión isotrópica
Triaxial TIS

5.4.1.1 Análisis de la Macroporosidad

En el estudio realizado en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX del año 2007 (CEDEX, 2007), se llevó a cabo un análisis morfométrico de la red porosa de los piroclastos volcánicos ensayados, con el fin de relacionar la macroporosidad de dichos materiales con sus propiedades resistentes.

Como se verá en el Capítulo 6, la resistencia de los piroclastos está muy relacionada con la densidad de los mismos, así como también con su porosidad. Aunque existe una dispersión elevada entre estas propiedades, sí se observa de manera clara que existe una relación entre ellas; por lo que debe existir una relación con la forma de los poros y por tanto con la estructura del material.

Del estudio del 2007 se obtuvo una clasificación de los piroclastos en función de su macroporosidad. A continuación se resumen las características de cada tipo de porosidad (CEDEX, 2007).

Los tipos de porosidad propuestos en el informe del 2007 son:

- Porosidad Reticular (Foto 5.3): se trata de una porosidad de tamaño muy variable y morfología irregular, adaptándose a la forma de las partículas y cristales que forman la roca. Prácticamente no existe matriz y por tanto el esqueleto sólido de estos piroclastos consiste en las partículas cementadas en sus puntos de contacto.
- Porosidad Vacuolar (Foto 5.3): la fábrica de los piroclastos que pertenecen a

este tipo consiste en una masa más o menos homogénea con apariencia bastante vítrea, en cuyo seno se encuentran cristales fundamentalmente máficos. También en el seno de ésta masa vítrea homogénea se observan una gran cantidad de vacuolas pseudoesféricas., tanto aisladas como conectadas entre sí.

- Porosidad Mixta (Foto 5.4): los piroclastos que presentan este tipo de porosidad muestran dos morfologías diferentes de poros: por un lado, una macroporosidad interclasto, irregular, que recuerda a la porosidad reticular, cuya forma está condicionada por los cristales y partículas a los que rodea. Por otro lado, existe una porosidad intra-clastos en los que se observan vacuolas, algunas de ellas aisladas y otras conectadas, de formas sub-redondeadas que confieren a la roca una textura pumíticos o espumosa, formado por una „esponja’ de material vítreo.
- Porosidad no-macroscópica (matriz): estas rocas se caracterizan por la presencia de una matriz arcillosa que rodea a las partículas. Por esta razón, la porosidad de la roca calculada a partir de su densidad, se encuentra dentro del rango de la microporosidad, y es demasiado pequeña para poder medirla con exactitud a esta escala.

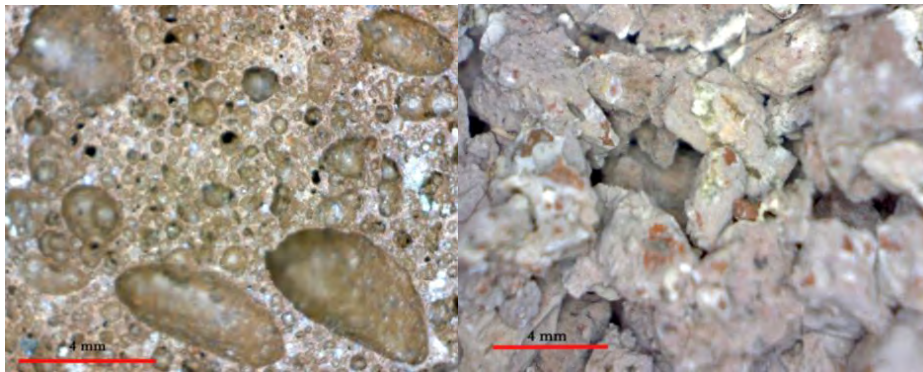


Foto 5.3: Izqda.: Porosidad del tipo vacuolar (M-LPT-07). Dcha.: Porosidad del tipo reticular (M-7074).

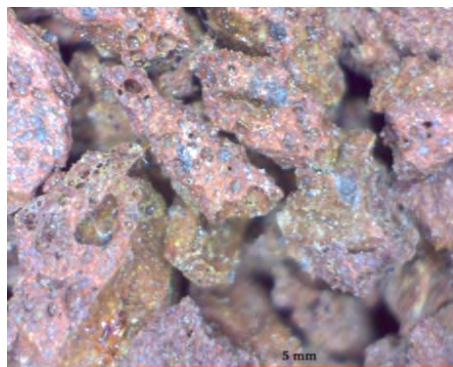


Foto 5.4: Porosidad mixta (M-LPT-07).

En cuanto a los materiales ensayados durante esta investigación se observó que la mayoría de las muestras correspondiente a las Lapillis (sin alteración) presentan diferentes porosidades en función de la escala de observación, como puede verse en la Foto 5.5. A nivel de partículas, las lapillis presentan una porosidad del tipo Vacuolar, mientras que a escala de conjunto, su porosidad es de tipo Reticular. En definitiva, las Lapillis tienen porosidad del tipo Mixta.

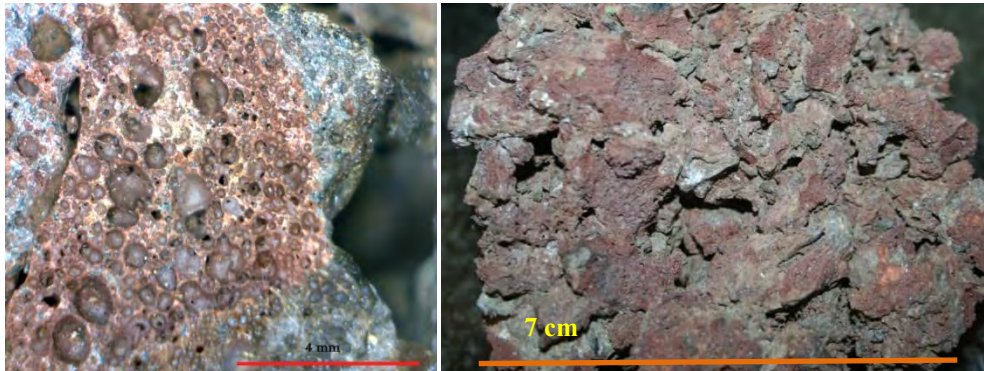


Foto 5.5: Fotografías de la M-7078 a diferente escala. En la imagen de la Izqda. se observa como a nivel de partículas, la porosidad es de tipo vacuolar, mientras que como se ve en la imagen de la derecha, en conjunto la porosidad es de tipo reticular.

Para el caso de las Pómez ensayadas, a nivel de partículas, la porosidad es microscópica, por lo tanto su porosidad vacuolar es pequeña, sin embargo, a nivel de conjunto este tipo de material presenta una porosidad Reticular (Foto 5.6).

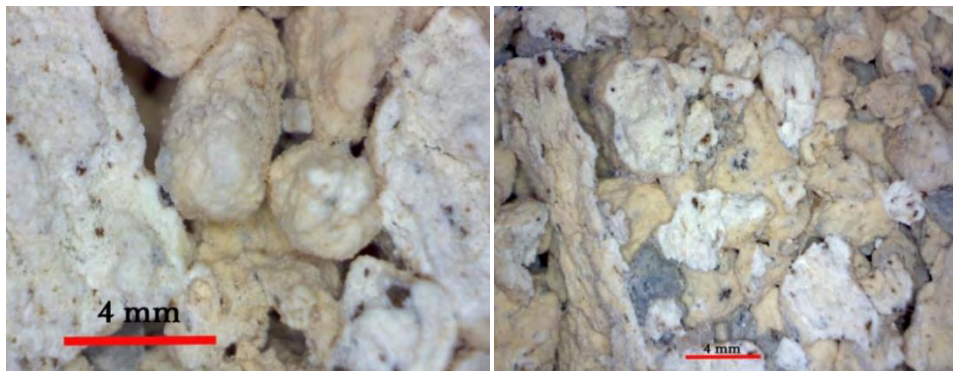


Foto 5.6: Pómez (M-6638).

En los piroclastos de caída alterados, como es el caso de las M-7076, M-7077, M-7079, M-7080, los poros inter-partículas (aquellos que conforman la porosidad de tipo reticular) están rellenos, en diferentes porcentajes, por un material arcilloso, por lo que su porosidad a nivel macroscópico es matriz (Foto 5.7).

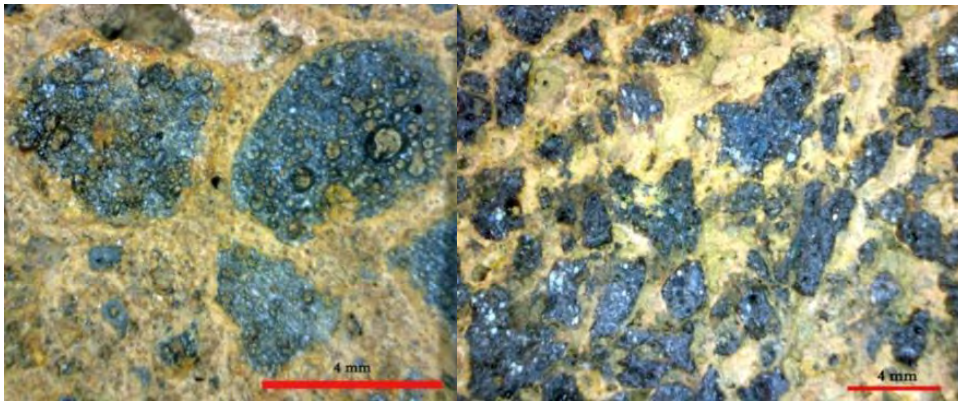


Foto 5.7: Muestras alteradas. Izquierda, M-7076; derecha, M-7077.

5.4.1.2 Propiedades químicas

Se analizaron las muestras con el fin de obtener la composición química en forma de porcentaje (en peso) de los óxidos de las diferentes muestras. Los datos obtenidos permiten obtener el nombre geológico de la roca, el cual indica su origen y aporta información sobre su evolución. Para esto se utiliza el diagrama TAS (Capítulo 2) (Fig. 5.10) que correlaciona el contenido en sílice con el contenido en álcalis de las rocas.

De todos los parámetros analizados, el más importante es el contenido en SiO_2 , que, por un lado, permite clasificar las rocas en ácidas, intermedias, básicas y ultra-básicas; y por otro, en sub-saturadas, saturadas y sobre-saturadas (Capítulo 2) (Fig. 5.11).

La Fig. 5.12 muestra los Diagramas TAS para todas las muestras analizadas tanto en el año 2007 como las nuevas.

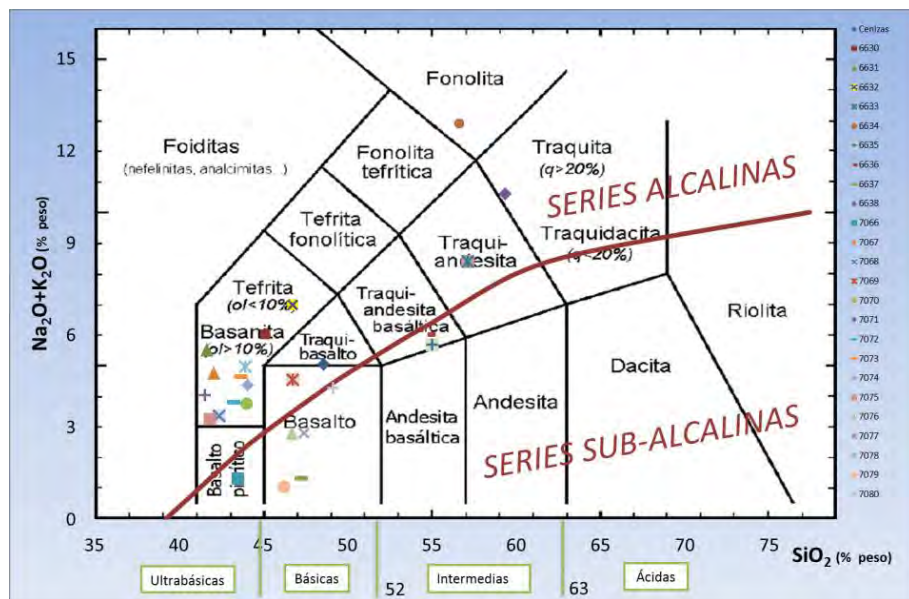


Fig. 5.10: Diagrama TAS, en este diagrama está representado la clasificación en función del contenido en SiO_2 y la clasificación de las series Alcalinas y Sub-alcalinas de Irvine & Baragar 1971.

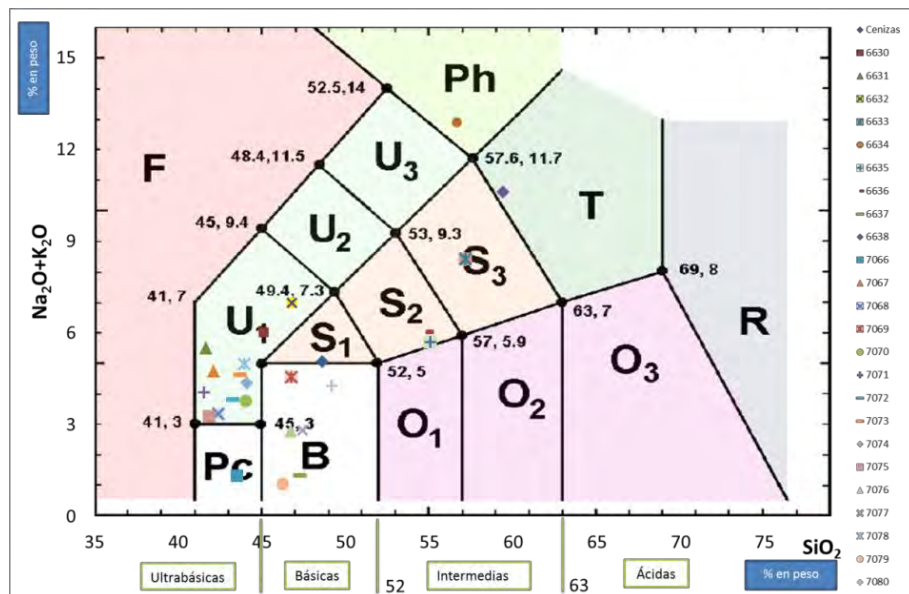


Fig. 5.11: Diagrama TAS mostrando la clasificación por saturación en SiO_2 (O: Sobresaturadas en SiO_2 , S: Saturadas y U: Sub-saturadas).

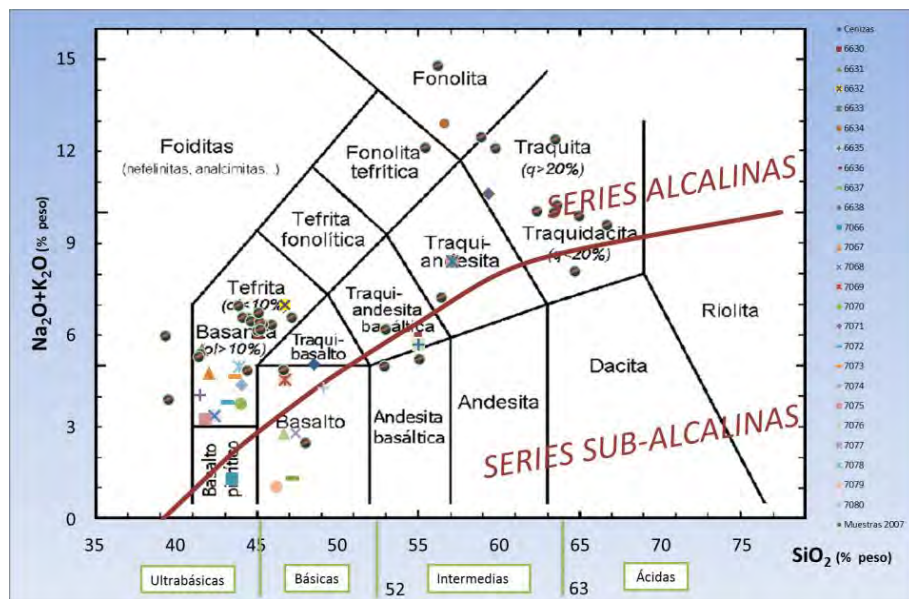


Fig. 5.12: Diagrama TAS mostrando las muestras ensayadas en el año 2007.

La evolución de las composiciones químicas de las muestras ensayadas es típica de las rocas volcánicas de las Islas Canarias, variando desde magmas básicos a magmas intermedios o ácidos y predominantemente alcalinos.

5.4.1.3 Propiedades mineralógicas

Se han realizado difractogramas de rayos-X de polvo con el fin de obtener la mineralogía global de las muestras estudiadas. En las Fig. 5.13, Fig. 5.14 y Fig. 5.15 se resumen las composiciones mineralógicas de las rocas de una forma cualitativa y el porcentaje de vidrio volcánico presente en las muestras.

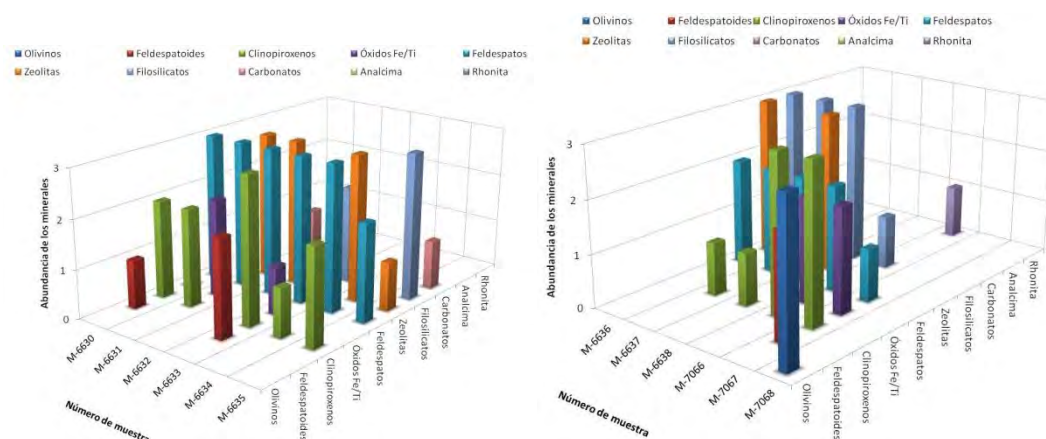


Fig. 5.13: Composición mineralógica de las diferentes muestras de piroclastos. La abundancia de los minerales va desde 0 a 3. Parte I.

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

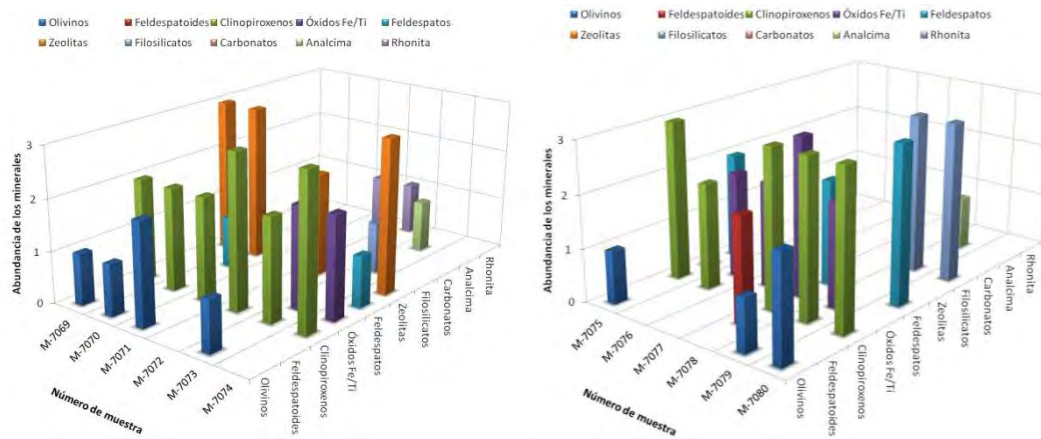


Fig. 5.14: Composición mineralógica de las diferentes muestras de piroclastos. La abundancia de los minerales va desde 0 a 3. Parte II.

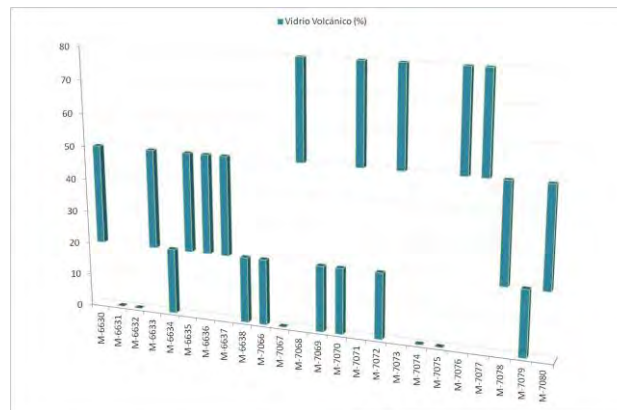


Fig. 5.15: Porcentaje de vidrio volcánico presente en las muestras ensayadas durante esta investigación.

5.4.1.4 Ensayos de resistencia y deformabilidad

5.4.1.4.1 Ensayo de Compresión Simple (CSP)

En la Fig. 5.16 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de compresión simple, además se presenta los valores del Módulo de Young, las porosidades y sus densidades.

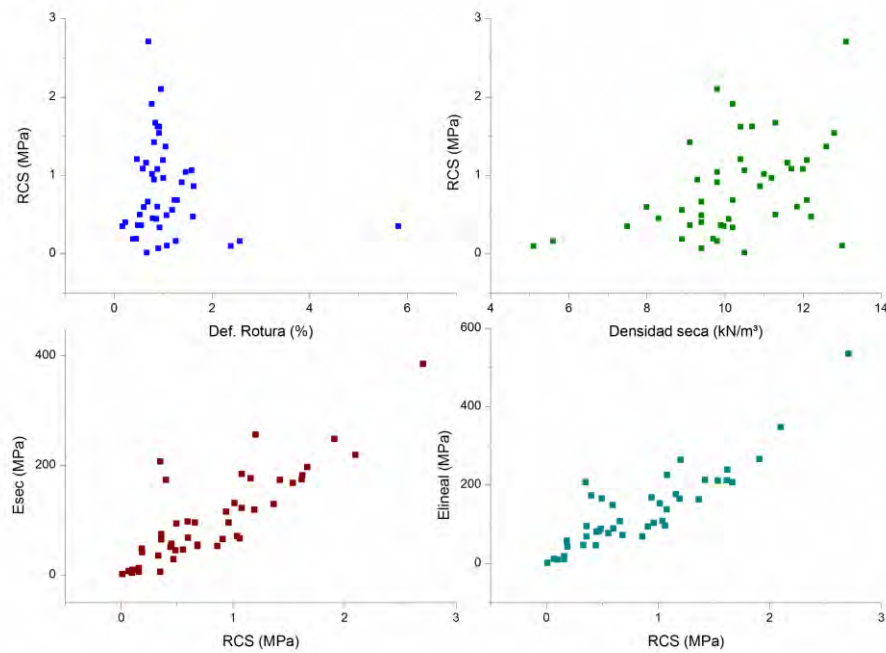


Fig. 5.16: Resumen de los ensayos de compresión simple en las nuevas muestras. En esta figura se muestran los pesos específicos y diferentes módulos de deformabilidad ($E_{Sec \sigma C}$: Modulo de Young secante a la resistencia a compresión simple, E_{lineal} : pendiente de la porción recta de la curva).

5.4.1.4.2 Ensayos Triaxial CI

Las Fig. 5.17 y Fig. 5.18 muestran algunas de las curvas de colapso más características obtenidas en los ensayos Triaxiales CI (Compresión Isótropa). Para ver todas las gráficas de las diferentes muestras ensayadas ver Anejo 1.

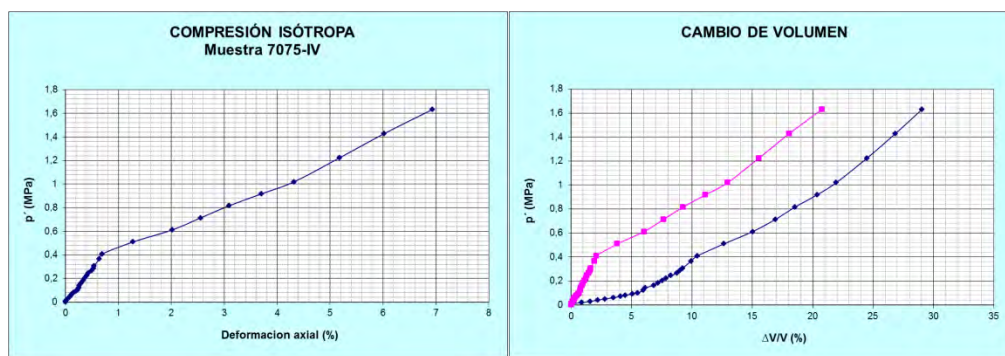


Fig. 5.17: Ensayo de compresión isótropa en la M-7075. Izqda.: Gráfica presión isótropa versus deformación axial. Se observa como para un valor de 0.4 MPa se produce el colapso de la estructura, el cual se traduce en un aumento brusco de la deformación. Dcha.: Gráfica presión isótropa versus cambio de volumen. En azul esta la curva medida y en rosa la curva estimada; ambas curvas reflejan el momento del colapso.

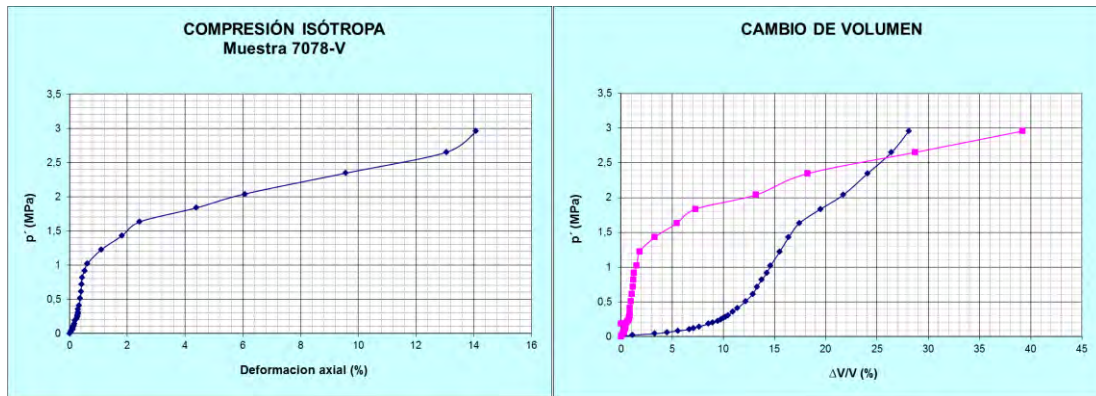


Fig. 5.18: Ensayo CI en M-7078-V.

Al estudiar las curvas de compresión isotrópica de los diferentes materiales, cabe destacar las diferencias entre el comportamiento de las pómez y lapillis. Como se observa en las Fig. 5.17 y Fig. 5.18, ambas correspondientes a unas lapillis, el valor de la presión a partir de la cual se produce el colapso de estructura es claro, mientras que si se observan las curvas de las pómez este valor no es fácil de determinar ya que van rompiendo poco a poco hasta que ese cambio de pendiente es evidente (Fig. 5.19), y en algunos casos ese cambio de pendiente es muy pequeño en la curva de cambio de volumen. Esto puede ser debido a que, como en el ensayo de compresión isotrópica ese valor a partir del cual la estructura cambia está relacionado con la resistencia de las partículas, y por tanto cuanto mayor sea la resistencia de las mismas más brusco será el colapso. Las partículas de pómez tienen una resistencia menor que las de lapillis debido a su composición.

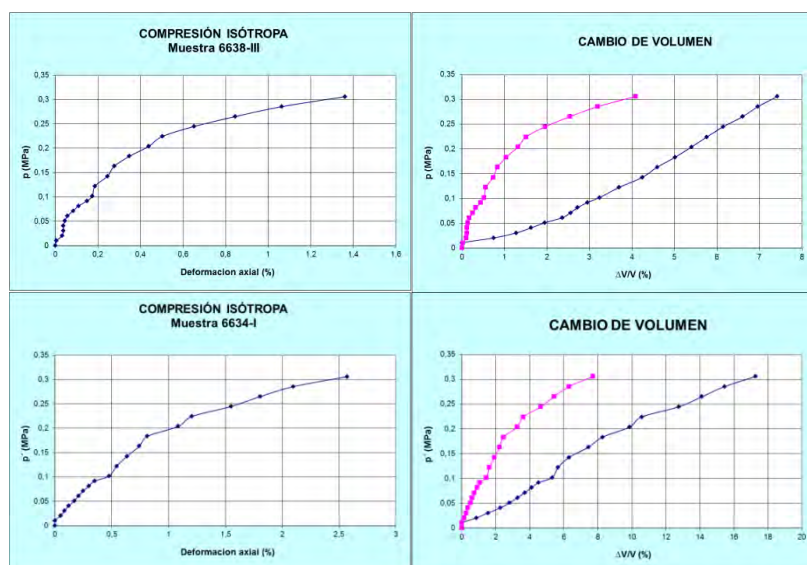


Fig. 5.19: Ensayo CI en muestras 6638 (arriba) y 6634 (abajo). Pómez.

En la Fig. 5.20 se resumen los resultados obtenidos en todas las muestras ensayadas para este trabajo, así como las densidades de las mismas, el módulo de compresibilidad antes del colapso ($k = \frac{\Delta p}{\Delta V/V}$), el módulo de elasticidad pre y post-colapso (E_{mi} y E_{mc} , respectivamente) y la deformación volumétrica en el punto de colapso.

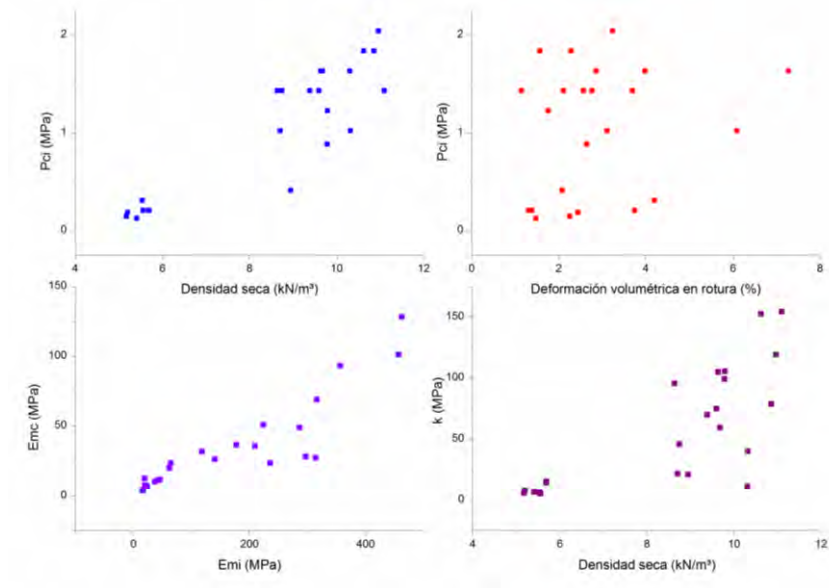


Fig. 5.20: Resultados de los ensayos de compresión isotrópica CI.

5.4.1.4.3 Ensayos Triaxiales especiales: TIS (“*Triaxial Isotropic Shear*”)

Las gráficas que se presentan en la Fig. 5.21, muestra los resultados obtenidos en los ensayos TIS tanto en las muestras M-7075 como en la M-7078. Las gráficas de los ensayos CI de ambas muestras se recogieron en las Fig. 5.17 y Fig. 5.18, respectivamente.

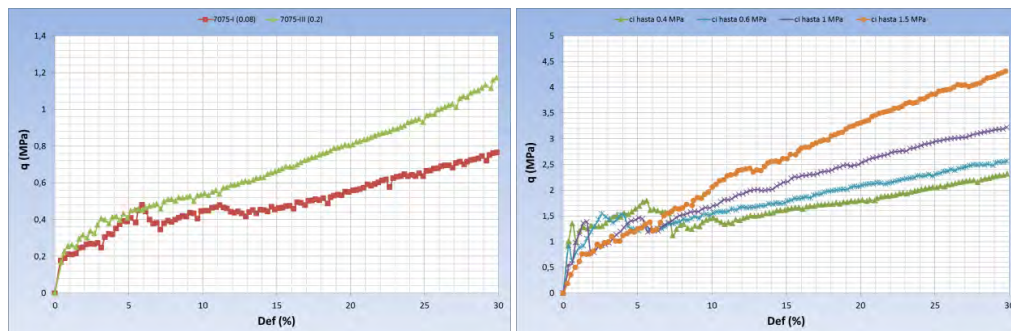


Fig. 5.21: Resultados de los ensayos TIS realizados en el M-7075 y el M-7078 respectivamente, con diferentes presiones de confinamiento, dichas presiones de confinamiento están en función del valor de la presión de colapso.

En la Fig. 5.22 se recogen los resultados de todos los ensayos realizados durante esta investigación, es decir, los ensayos de compresión simple, los de compresión isotrópica y los TIS. Las muestras se presentan con la nueva clasificación, que se explica en el siguiente apartado. En el apartado 5.4.3, estos datos se separan por número de muestra para poder realizar el ajuste.

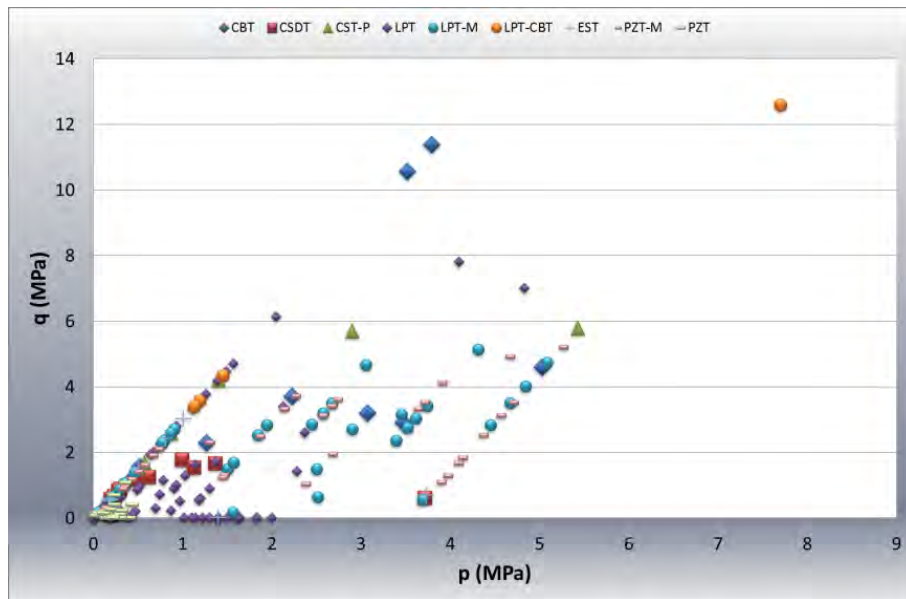


Fig. 5.22: Resultados de los ensayos TIS, CI y CSP llevados a cabo durante esta investigación. Variables de Cambridge.

En el Anejo 1 se recogen los resultados de todos los ensayos realizados.

5.4.2 Clasificación geotécnica de los piroclastos de baja densidad

5.4.2.1 Introducción: Clasificación previa

Antes de mostrar los diferentes ajustes obtenidos en las muestras ensayadas durante esta investigación, se va a explicar las características de cada material y por qué se decidió separarlos en diferentes grupos a la hora de realizar los ajustes.

En un principio se utilizó la clasificación (Tabla 5.8) propuesta en *Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de Canarias* (2011). Esta clasificación es muy práctica y fácil de utilizar; sirve para definir los diferentes tipos de materiales de baja densidad desde el punto de vista de la composición del magma, tamaño de las partículas y grado de soldadura, sin tener en cuenta la génesis del material. Es una clasificación de tipo cualitativo, que no entra a cuantificar ninguna propiedad geotécnica de los materiales.

Tabla 5.8: Litotipos definidos. Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de Canarias (2011)

PIROCLASTOS BASÁLTICOS	LAPILLI (LP)	SUELTO (S)	LPS
		SOLDADO (T)	LPT
	ESCORIAS (ES)	SUELTO (S)	ESS
		SOLDADO (T)	EST
	CENIZAS BASÁLTICAS (CB)	SUELTO (S)	CBS
		SOLDADO (T)	CBT
PIROCLASTOS SÁLICOS	PÓMEZ (PZ)	SUELTO (S)	PZS
		SOLDADO (T)	PZT
	CENIZAS SÁLICAS (CS)	SUELTO (S)	CSS
		SOLDADO (T)	CST

Una vez finalizados los ensayos realizado para este trabajo, se observó que geotécnicamente esta clasificación resultaba práctica para aquellos materiales que, o bien, no habían sufrido alteración alguna, o bien su grado de alteración era muy bajo (aquellas muestras que como la M-7074, han sufrido una alteración debido a la circulación de un fluido que provocó una precipitación de cristales de color blanco alrededor de las partículas (Foto 5.8)). Es decir, es válida para aquellas muestras cuya porosidad inter-partículas no ha sido modificada.

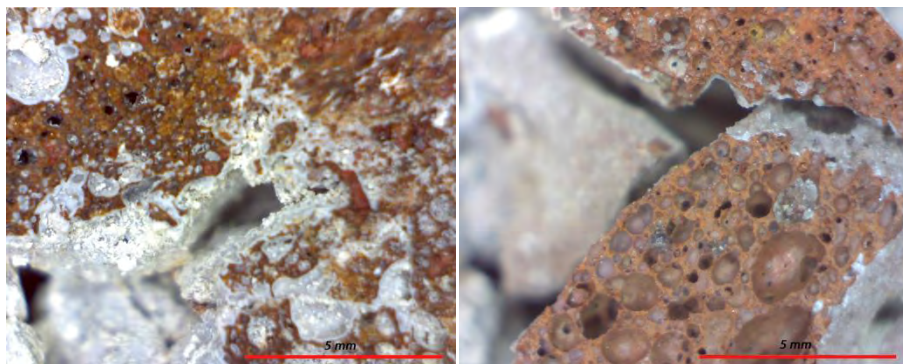


Foto 5.8. De Izqda. a dcha.: M-7072 y M-7074. Fotografías realizadas con microscopio de mano.

5.4.2.2 Nueva clasificación propuesta

Como resultado de los trabajos realizados para esta investigación se propone una nueva clasificación de los materiales volcánicos de baja densidad. Se trata de una clasificación de tipo geotécnico que, partiendo de la anterior (Tabla 5.8), trata de “redefinir” los grupos de materiales en función de sus propiedades geotécnicas y cuantificar los intervalos de variación de su densidad seca (γ_d), de su resistencia a compresión simple (CSP) y de su resistencia a compresión isotrópica (P_{ci}). En ella se separan los grupos de materiales por su composición magmática y su grado de soldadura, además de, como se ha indicado, por sus características geotécnicas más relevantes.






Se ha propuesto una nueva terminología y, además, se ha introducido un nuevo subgrupo dentro de cada grupo, con una letra D. La clasificación se recoge en la Tabla 5.10.

Es importante resaltar que para la realización de esta nueva clasificación, el primer valor relevante y mediante el cual se obtuvieron los diferentes grupos, fue el de la compresión simple, ya que es donde más datos se tienen y por tanto son grupos más fiables; a partir de aquí, el siguiente paso fue caracterizar cada grupo por su presión de colapso. En la Tabla 5.9 se recogen la cantidad de ensayos realizados en cada grupo tanto de compresión simple como de compresión isotrópica.

Tabla 5.9: Número de ensayos para cada grupo.

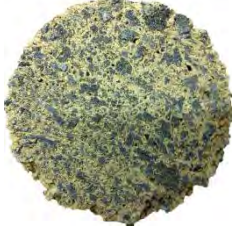


Litotipo	Compresión Simple	Compresión Isótropa
CBT	4	-
CSDT	4	-
CST-P	5	-
LPT	31	13
LPDT	8	5
LPT-M	13	-
ESDT	2	1
EST	3	-
PZT-M	10	-
PZT	11	16
PZDT	1	2

Tabla 5.10: Caracterización geotécnica de los materiales volcánicos de baja densidad.

LITOTIPOS (Tamaño de partículas)				Grado Soldadura	γ_d (kN/m ³)	CSP (MPa)	P _{Cl} (MPa)
Depósitos piroclásticos	Piroclastos Basálticos	Lapillis (LP) (2-64mm)		LPT	8-18	0.3-8	>1
				LPDT	5-10.5	<0.3	0.2-2
				LPS	-	-	-
		Escorias (ES) (>64mm)		EST	9-13	1-4	>1.5
				ESDT	7-9	<1	<1.5
				ESS	-	-	-
		Cenizas basálticas (CB) (<2mm)		CBT	15-23	1-11	-
				CBDT	10-15	<1	>5*
				CBS	-	-	-
	Piroclastos sálcos	Pómez (PZ) (2-64mm)		PZT	5-7	0.1-1	0.1-0.5
				PZDT	<5	<0.1	<0.1
				PZS	-	-	-
		Cenizas sálcas (CS) (<2mm)		CST	>9.5	>1	-
				CSDT	<9.5	<1	>4*
				CSS	-	-	-

Presiones de colapso obtenidas mediante ajuste.

Tabla 5.11: Clasificación geotécnica de los materiales volcánicos de baja densidad. Continuación de la Tabla 5.10.

LITOTIPOS				Grado Soldadura	γ_d (kN/m ³)	CSP (MPa)	P _{CI} (MPa)
Depósitos de piroclastos alterados	Piroclastos Basálticos	LPT-M		-	9-18	0.1-3	7.5-12.5*
		CBT-P		-	-	-	-
	Piroclastos sálcos	PZT-M		-	8-13	0.2-2.5	3.3-7.5*
		CST-P		-	10-17	0.6-4.5	>8*

*Presiones de colapso obtenidas mediante ajuste.

**En gris aparecen aquellos materiales que no se han podido ensayar por falta de muestras.

La nueva terminología es la correspondiente a aquellas que tienen una D, esta letra se refiere a aquellos materiales que presentan un grado de soldadura débil. En materiales como lapillis y pómez, este límite entre débilmente soldada (DT) y soldada (T) hace referencia a una identificación de campo y son aquellos materiales cuyas partículas son relativamente fáciles de separar con la mano. Para aquellos materiales, como son escorias y cenizas, establecer el grado de soldadura en campo es más complicado por lo que se propone utilizar el valor de la compresión simple que se utiliza como límite entre suelos duros y rocas blandas propuesto por diferentes clasificaciones y que actualmente se considera adecuado, este valor es de 1 MPa y con él se separan las débilmente soldadas de las soldadas.

En cuanto a la nueva clasificación, denominada depósitos de piroclastos alterados, son aquellos materiales constituidos por piroclastos pero que por alguna razón, ya sea

porque hayan sufrido un proceso de edafización o porque sean materiales re-sedimentados o re-trabajados, su estructura ha cambiado y presentan, o bien matriz en diferentes proporciones (M), o bien son cenizas con partículas de diferente naturaleza (P). Estos materiales tienen un comportamiento geotécnico diferente, como se observa en la Tabla 5.10, en algunos casos su resistencia a compresión simple mejora (caso de las pómez) y en otros disminuye (caso de las lapillis), dependiendo del porcentaje de matriz, sin embargo la propiedad que, en estos materiales, aumenta en todos los casos es la presión de colapso, lo que desde un punto de vista ingenieril tiene gran importancia ya que esto hace disminuir el peligro de colapso brusco de las estructuras cimentadas en estos materiales, principal problema que se da en estos terrenos.

Una característica importante de estos materiales denominados depósitos de piroclastos alterados, es que en los ensayos triaxiales, la mayoría de ellos rompían por capas (Foto 5.9 y Foto 5.10), más adelante se explicará por qué sucede esto.



Foto 5.9: De Izquierda a derecha: M-7066, M-7072 y M-7077, después de ensayos TIS, se observa la rotura en capas.

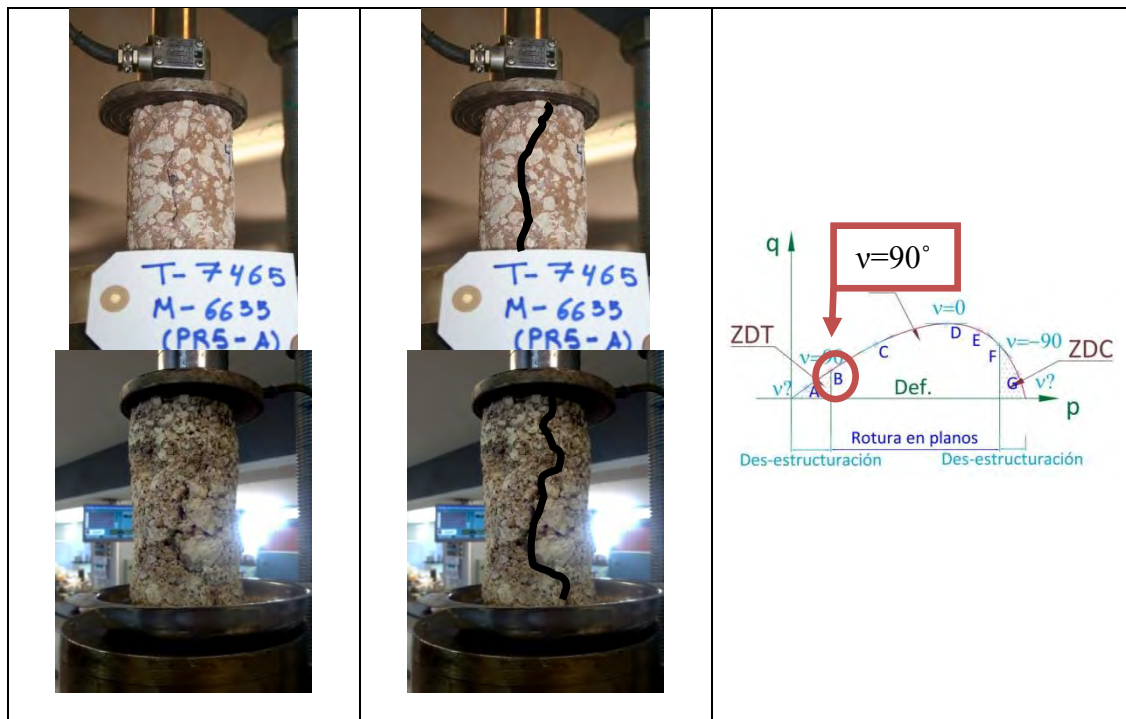


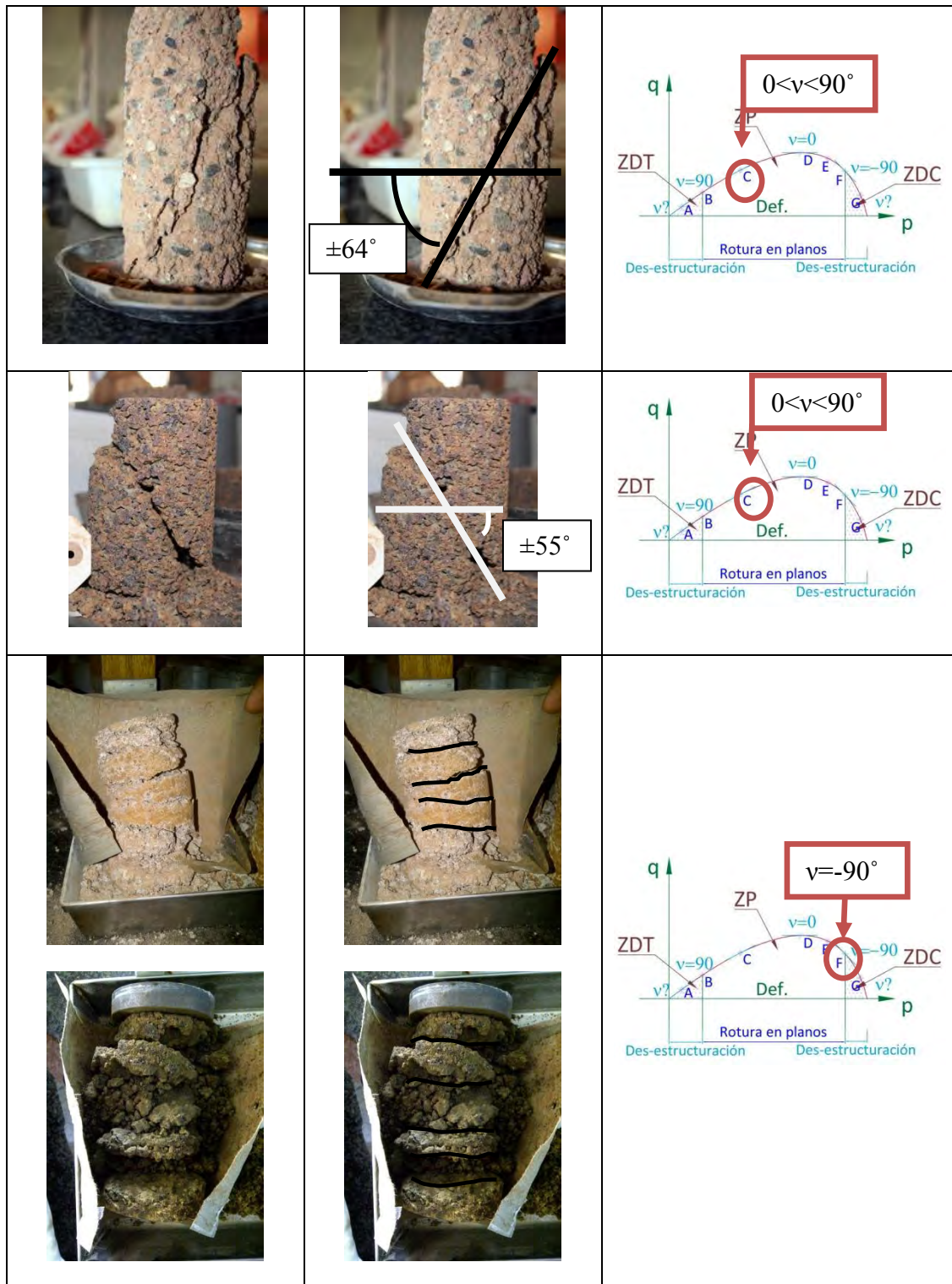
Foto 5.10: De izquierda a derecha: M-7080, M-4386 y M-4385, después de ensayos TIS, se observa la rotura en capas.

Dos casos singulares, que rompieron también en capas horizontales, fueron los de la M-7072 y M-4385; se tratan de piroclastos de caída débilmente soldados.

Antes de explicar la posible razón por la que estos materiales presentan un comportamiento similar al de los depósitos de piroclastos alterados bajo compresión triaxial, se debe explicar el comportamiento de los piroclastos bajo compresión simple y compresión isotrópica: de las observaciones de las probetas ensayadas en este trabajo se deduce que la rotura a compresión simple se produce habitualmente por las roturas de los contactos entre las partículas, por lo que el grado de soldadura es lo que prima en este tipo de rotura. Sin embargo, en la rotura por compresión isotrópica además de producirse la rotura de los contactos entre partículas, también se produce la rotura de las propias partículas, siendo este último fenómeno el que predomina en la reducción brusca de volumen del material, que produce el colapso. Las partículas de las muestras M-7072 y M-4385 han sufrido una alteración que pudo dar lugar a la disminución de la resistencia de las mismas provocando la formación de matriz durante el ensayo TI; esta puede ser la razón por la que dichas muestras presentan un comportamiento parecido al de los piroclastos alterados.

Analizando los tipos de rotura obtenidos tanto en los ensayos de CSP como en los ensayos TIS se observó que se cumplen algunos de los casos explicados en el Capítulo 4, apartado 4.3.1.6. A continuación se presentan, a modo de ejemplo, algunas roturas claras en los materiales ensayados juntos con la curva de rotura y el punto correspondiente a la misma:





Para el caso de la rotura isótropa (Punto G) no hay fotos pero se veía la probeta des-estructurada.

5.5 APÉNDICE: PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS ARTIFICIALES Y REALES

5.5.1 Preparación de las muestras

5.5.1.1 Muestras Artificiales

Las probetas se realizaron de la siguiente manera:

Muestras BCAP. Porosidad reticular:

Una vez mezclado el cemento, el agua y la bentonita, se vierte el porexpan y se remueve hasta que esté impregnado en cemento, luego se vierte la arlita y se remueven todos los componentes hasta que la mezcla sea homogénea. Esta mezcla se echa en un cilindro de PVC donde va a permanecer 4 días; al quinto día se le quita el PVC y al sexto día se meten en estufa a 100°C durante 24H. El séptimo día comienzan los ensayos (Fig. 5.23, Fig. 5.24).



Fig. 5.23: Tubos de PVC utilizados para realizar las probetas artificiales.



Fig. 5.24: Izqda.: Probeta BCAP-4 al día siguiente de haberle quitado el PVC. Dcha.: Probeta BCAP-4 después de secado en estufa a 100°C, en esta foto se puede ver como las mayorías de las bolitas de porexpan que quedan en el perímetro exterior de las probetas desaparecen durante el secado en estufa.

Muestras BCP. Porosidad vacuolar (Fig. 5.25):

El procedimiento fue similar que el llevado a cabo en las muestras BCAP, sólo que en este caso no se utilizaba arlita, por lo que una vez que se mezclaban el

conglomerante con el porexpan, se vertían directamente en los PVC.

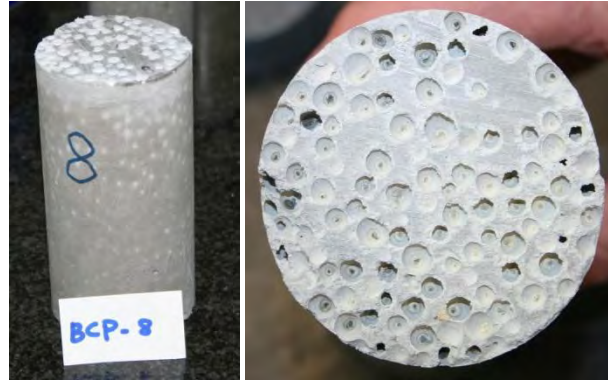


Fig. 5.25: Izqda.: Probeta BCP-8 al día siguiente de haberle quietado el PVC. Dcha.: Probeta BCP-8 después de secado en estufa a 100°C, en esta foto se puede ver como las bolitas de porexpan que quedan en el perímetro exterior de las probetas desaparecen durante el secado en estufa.

5.5.1.2 Muestras reales de piroclastos

Después de estas primeras muestras el procedimiento seguido para el tallado de todas las probetas posteriores fue el siguiente:

1. Congelación de los bloques. Para esto se metían los bloques en bolsas de plástico muy resistentes (Fig. 3.26), se llenaban de agua hasta que se cubrían los bloques y se introducían en un congelador 72H.



Fig. 3.26: Bloque de piroclastos antes y después de congelado.

2. Tallado de las probetas congeladas con la perforadora manual (Fig. 5.27). La altura de las probetas obtenidas variaba entre 12-15 cm. El diámetro de las probetas era de 64mm. La broca utilizada para obtener las probetas era de diamantes.



Fig. 5.27: Izqda.: Máquina perforadora sacatestigos manual. Dcha.: Probetas de pómez en la estufa a 100°C.

3. Secado de las probetas en estufa a 100°C (Fig. 5.27)

Algunas probetas de piroclastos se tuvieron que tallar a mano ya que no era posible obtener probetas de calidad aunque se congelaran. Tal es el caso de la pómez 6638 y 6634 (Fig. 5.28).



Fig. 5.28: Tallado manual de las probetas de pómez 6634.

Según Cecconi (1998) los efectos de la congelación sobre la microestructura del material son pequeños. Este autor llevo a cabo un estudio en puzolana, que es una roca débil y cuya fábrica es similar a la de los materiales aquí estudiados. Los efectos producidos fueron parcialmente investigados mediante la medición, antes y después de la congelación, de la velocidad de las ondas de compresión; las cuales parecen reflejar el grado de micro-fisuración de las rocas y por lo tanto en este caso puede reflejar la posible reducción de las propiedades elásticas inducidas por congelación. Los resultados obtenidos por Cecconi muestran cómo la congelación reduce sólo un 12% el modulo elástico dinámico (calculado como la diferencia de los módulos, medidos antes y después de la congelación, dividido por su valor medio).

5.5.2 Etapas realizadas en la búsqueda del ‘piroclastos ideal’

5.5.2.1 Conglomerante

5.5.2.1.1 Preparación de las diferentes probetas

Las probetas para la realización de los diferentes ensayos se obtuvieron de la siguiente forma, en función de su composición:

5.5.2.1.1.1 Probetas CB (Fig. 5.29)

1. Se ponía a saturar la bentonita durante 24H.
2. Una vez saturada la bentonita se realizaban las probetas, las cuales se dejaban secar a temperatura ambiente durante 5 días.
3. A continuación, se metían en estufa a 100°C durante 24H.

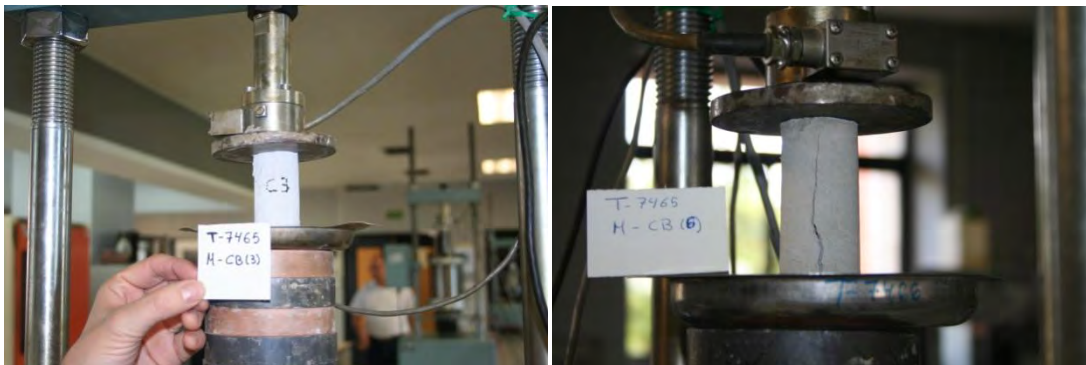


Fig. 5.29: Probetas de cemento y bentonita.

5.5.2.1.1.2 Probetas EPA-C y EPA-C3 (Fig. 5.30)

1. Una vez mezclados el agua y la escayola, se vertía la mezcla en un tubo de PVC.
2. La probeta permanecía 1H35min con una sola vía de respiración y luego se le quitaba la parte de abajo dejando así dos vías de respiración durante 30min.
3. Se dejaba secar 24H a temperatura ambiente y luego se metían en estufa 6 días más.
4. Al séptimo día se realizaban los ensayos de compresión simple.



Fig. 5.30: Probetas de escayola.

5.5.2.1.2 Metodología de ensayos

El primer paso fue la determinación, mediante ensayos de compresión simple, del tipo de conglomerante y su dosificación.

Para saber cuál era el mejor resultado se tomó como base la resistencia a compresión simple de los piroclastos ensayados hasta la fecha.

Las probetas ensayadas tenían las siguientes dimensiones: diámetro 3,5 cm y una altura de 10 cm.

Al principio se realizaron probetas con diferentes dosificaciones de escayola. A continuación se resumen los pasos seguidos:

5.5.2.1.2.1 Grupos EPA A-B (Fig. 5.31)

- A y B formadas por 100g de agua y 50g de escayola.
- A2 y B2 formadas por 100g de agua y 75g de escayola.

Se realizaron 2 grupos iguales, cada uno formado por 2 probetas con distinta dosificación para ver cuál resistía más a compresión simple. Además, para comprobar si la temperatura de secado influía en la resistencia de la probeta, dentro de cada grupo, una se secó a 45°C y otra a 100°C.

De los resultados de los ensayos de compresión simple, se llegó a la conclusión de que la temperatura óptima de secado era de 45°C, ya que la resistencia era mayor.

5.5.2.1.2.2 Grupos EPA C, EPA C3, EPA D (Fig. 5.31)

Los grupos EPA C y EPA C3 están formados por probetas cuya dosificación es: 50g de escayola y 100g de agua, mientras que el grupo EPA D tiene una dosificación de 100g de agua y 75g de escayola.

Debido a que las probetas con 75g de escayola tenían una resistencia elevada, en un

principio, se optó por la dosificación de 100/50.

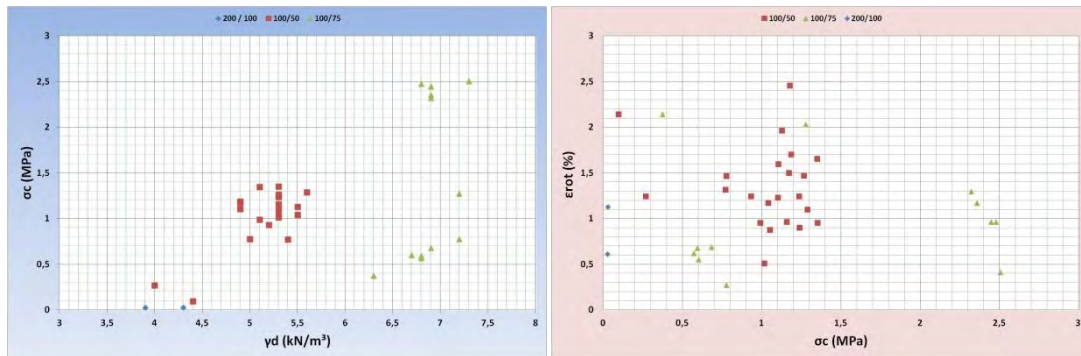


Fig. 5.31: Resultados de los ensayos de compresión simple en las muestras de escayola. Dcha. RCS versus densidad seca. Izq. Deformación en rotura versus RCS. Las probetas con valores más bajos de RCS corresponden a las que se secaron a una temperatura de 100°C.

Una vez encontrado un conglomerante cuya resistencia, a compresión simple, fuera más o menos similar a la de los piroclastos reales, se prosiguió con la realización de probetas con una estructura similar a la de los piroclastos de estudio, formada por arlita (con una altura de 14 cm y un diámetro de 7,1cm).

Dichos grupos fueron: EPA E, EPA F, EPA F2, EPA G, EPA G1, EPA-G2 (Fig. 5.32). Con una dosificación de: 100g de agua, 50g de escayola y 400g de arlita F-7.

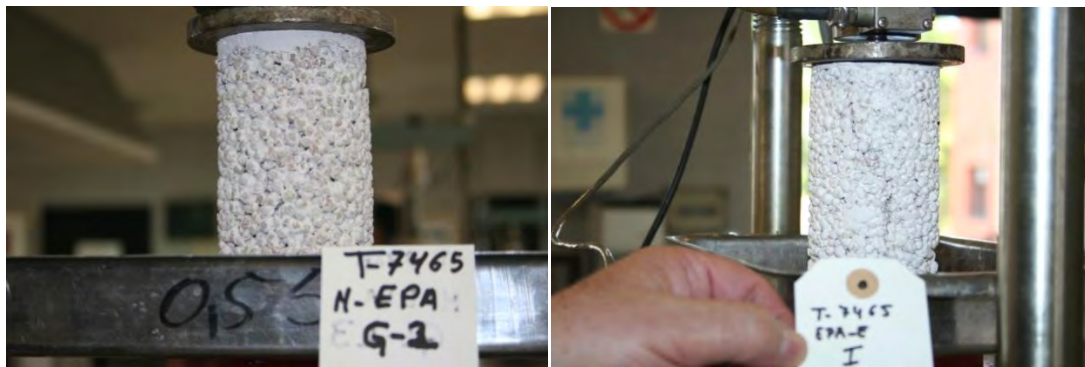


Fig. 5.32: Probetas formadas por arlita y escayola. Dcha.: Grupo EPA-G. Izq.: Grupo EPA-F.

Los ensayos, además de presentar una alta dispersión, daban resistencias muy bajas; por esta razón se decidió seguir por la vía del cemento.

Paralelo a los ensayos sobre las muestras EPA se realizaron varias probetas con diferentes dosificaciones de cemento (Grupo CMT). Estas probetas perdían mucha agua por exudación del cemento, por lo que se decidió usar bentonita para que además de disminuir la exudación del cemento, aumentara la resistencia de la mezcla

agua-cemento; estos grupos fueron los CB (Fig. 5.34).

Para ver qué porcentaje de bentonita y cemento se necesitaba para conseguir un buen conglomerante, se ensayaron probetas con distintas cantidades de bentonita (entre 2 y 7,5 gr) y diferentes contenido en cemento (de 100 y 150gr).

De los resultados de estos ensayos se pudo observar que el grupo que tenía mejor comportamiento era el que tenía una dosificación de 100 gr de agua, 100 gr de cemento y 2 gr de bentonita (Fig. 5.33).

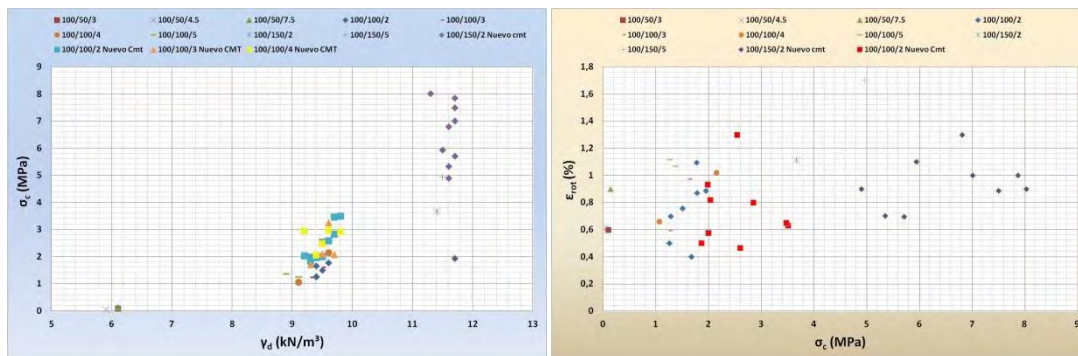


Fig. 5.33: Resultados de los ensayos de compresión simple en muestras con cemento y bentonita. Dcha. RCS versus Densidad seca. Izq. Deformación en rotura versus RCS.

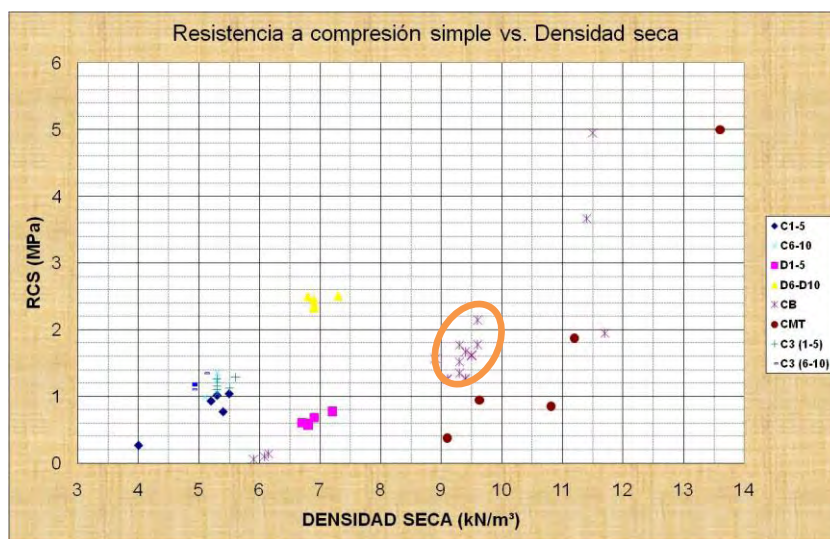


Fig. 5.34: Gráfica resistencia a compresión simple versus densidad seca. Se muestran los resultados de las diferentes muestras ensayadas. C y C3: 100g de agua y 50 de escayola, D: 100g de agua y 75 de escayola, CB: Cemento-Bentonita con diferentes dosificaciones. Los resultados resaltados pertenecen a la dosificación elegida: 100g de agua, 100g de cemento y 2g de bentonita.

5.5.2.2 Probetas BCAP y BCP

A continuación, se elaboraron nuevas probetas (Grupo BCAP y Grupo BCP) con el

fin de conseguir el “piroclasto ideal”.

Para el caso de los piroclastos, cuya porosidad sea del tipo reticular (Fig. 5.1), se realizaron probetas (Grupo BCAP, Fig. 5.35) con arlita y porexpan pequeño (para simular la estructura de dichos materiales), con la siguiente dosificación:

- 100 / 100 / 2 / 285,62 / 5,8 (Agua / Cemento / Bentonita / Arlita F3 / Porexpan pequeño) (gr.)



Fig. 5.35: Probeta BCAP con porexpan pequeño. Estructura reticular.

Las probetas hechas con dicha dosificación y composición no dieron el resultado esperado en los ensayos y una de las posibles causas de este comportamiento fue que dichas probetas presentaban una porosidad baja con respecto a los materiales de estudio. Por este motivo se aumentó la cantidad de porexpan, ya que este material no tiene resistencia de ningún tipo y por lo tanto puede comportarse como un hueco.

Pero al realizar los ensayos de compresión simple se vio que estas probetas tenían muy baja resistencia y, por lo tanto, no eran válidas.

Para solventar este problema, se optó por la modificación en la composición del conglomerante, aumentando la cantidad de cemento; quedando la dosificación en:

- 100 / 150 / 2 / 305,02 / 3,64 (Agua / Cemento / Bentonita / Arlita F3/ Porexpan pequeño) (gr.)

Estas probetas daban resistencias a compresión simple y deformaciones similares a los piroclastos que se intentan emular.

Por otro lado, para simular los piroclastos cuya porosidad sea del tipo vacuolar (ver figura), se realizaron probetas (Grupo BCP) con la siguiente dosificación:

- 300-400 / 450-600/ 6-8 / 2,70 -2,91 (Agua / Cemento / Bentonita / Porexpan)(gr)

Los resultados de los ensayos de compresión simple sobre estas probetas, no fueron los deseados, ya que presentaban una deformación elevada en rotura y alta

dispersión.

El segundo paso fue la realización de ensayos de compresión isotrópica. Este ensayo tiene como objetivo conocer la presión de colapso del material, la cual tiene lugar cuando se destruye la estructura y su deformación aumenta bruscamente (Fig. 5.36).

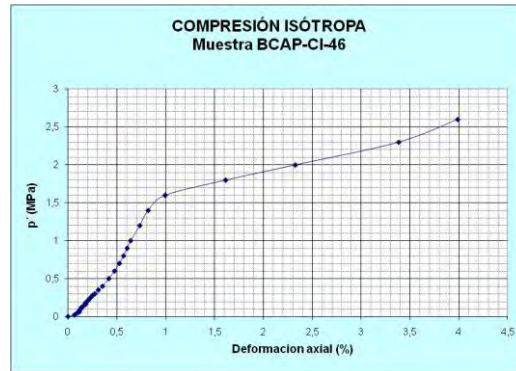


Fig. 5.36: Resultado del ensayo de compresión isotrópica en una muestra BCAP. Se observa cómo a partir de un valor de $p' > 1.5$ MPa se produce un colapso que se traduce en un aumento brusco de la deformación.

Con la dosificación ensayada hasta ahora, no se consiguió el colapso de la estructura en ninguno de los grupos ensayados.

A continuación se va a explicar la evolución de cada grupo por separado:

A partir de este momento la mayoría de los ensayos fueron de Compresión Isótropa y de vez en cuando se llevaban a cabo Compresiones Simples.

5.5.2.2.1.1 Grupo BCAP

Para intentar conseguir el colapso de la estructura, se disminuyó el contenido en Arlita F3, manteniendo la misma dosificación del conglomerante, y además para aumentar la porosidad se cambió el porexpan por uno de mayor tamaño (Fig. 5.37).

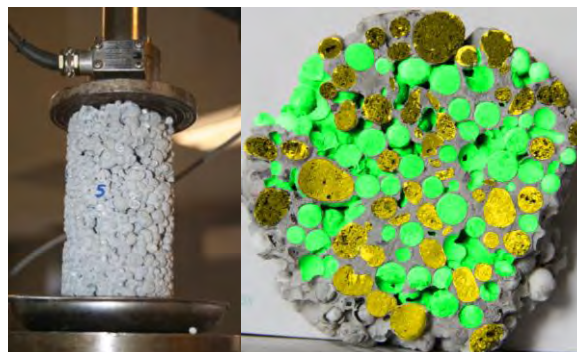


Fig. 5.37: Dcha.: Probeta BCAP con el porexpan grande. Izq.: Sección transversal de una probeta BCAP, en verde aparecen los huecos dejados por el porexpan cuando se sacan de la estufa, y en amarillo la arlita.

La nueva dosificación es: 100/150/2/260/±2 (agua/cemento/bentonita/arlita/porexpan grande) (gr). Con esta dosificación se logró el colapso de la estructura (Fig. 5.36).

A partir del grupo BCAP XX, se cambió el tipo de Arlita por una que era menos densa. Para mantener el mismo volumen que las probetas anteriores lo que se hizo fue rellenar el mismo volumen que ocupaba la arlita F3 con la arlita AREXPAN, esto traducido en peso es 160 gr en lugar de 260gr. Se consiguió bajar algo más la densidad de las probetas, lo que también ayudó a que los piroclastos artificiales fueran más parecidos a los reales.

A partir del grupo BCAP XXVII, se decidió realizar ensayos TIS, sometiendo a las probetas a una compresión isótropa que varía entre 1 y 4 kgf/cm², y a continuación aplicándoles un desviador hasta rotura al 30%.

Se da el caso, de que algunas probetas colapsan antes de lo previsto, por lo que se decide continuar con el ensayo TIS para ver si existe una diferencia entre las gráficas de probetas que no presentaron colapso, durante la compresión isótropa, y las que sí colapsaron. Estos casos fueron las siguientes probetas: BCAP-100 hasta BCAP-105, BCAP-108, BCAP-110.

Con estas pruebas se observó, que en la mayoría de los casos, aquellas probetas que habían colapsado durante la compresión isótropa no presentaban un pico acusado al principio en las gráfica TIS, por lo que esto ayuda a confirmar el colapso de la estructura.

En las probetas BCAP-106 y BCAP-107, se llegó a presiones isótropas tan altas para asegurar el colapso.

A partir del grupo BCAP XXX, se cambió la marca del cemento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los ensayos de compresión simple llevados a cabo en este grupo (NBCAP) dieron unos resultados elevados con respecto a los anteriores. Por esta razón se decidió hacer 4 grupos de probetas pequeñas, como al inicio del estudio, con diferentes cantidades de cemento y bentonita.

De estos ensayos, se llegó a la conclusión de que usando este cemento la cantidad de cemento tenía que ser menor para obtener unas resistencias a compresión simple similares a la del otro cemento. La nueva dosificación Agua-Cemento es: 100/100.

Con esta nueva dosificación se continúa todo el estudio para obtener un número representativo de ensayos en muestras iguales.

A partir del grupo NBCAP XXXI, se continuó con los ensayos TIS, siguiendo el mismo procedimiento, con el fin de tener un número significativo de datos tanto para el análisis estadístico como para el ajuste de las curvas.

5.5.2.2.1.2 Grupo BCP

Se realizaron nuevas probetas BCP (Fig. 5.38) con menos agua. Dichas probetas tenían un comportamiento más parecido a lo que se intenta emular, pero la estructura no colapsó. Por este motivo se realizaron más probetas con diferentes dosificaciones.

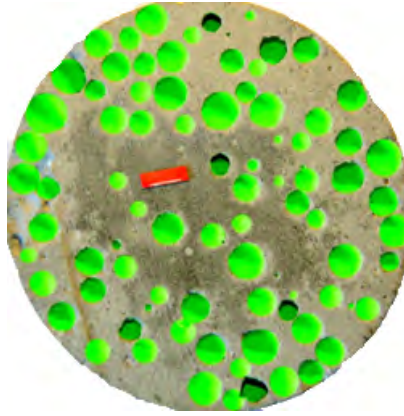


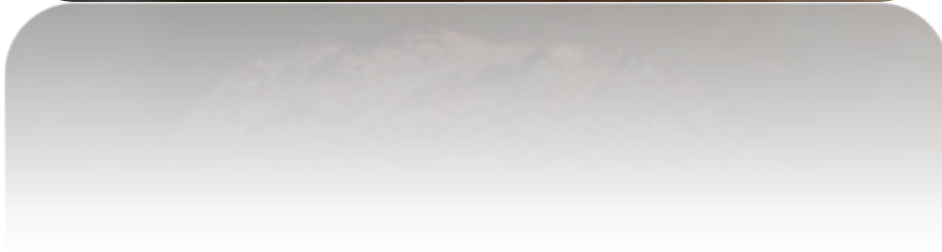
Fig. 5.38: Fotografía transversal de una probeta BCP. En verde están pintados los poros (porexpan).

El colapso de la estructura se produjo para los grupos con las siguientes dosificaciones:

- 300/450/6/3.75 (agua/cemento/bentonita/porexpan) (gr)
- 300/600/6/3.75 (agua/cemento/bentonita/porexpan) (gr)
- 220/403/4.4/3.75 (agua/cemento/bentonita/porexpan) (gr)

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS:
CURVAS DE CORRELACIÓN Y PARÁMETROS DEL
TERRENO



ÍNDICE

6.1	INTRODUCCIÓN	1-2
6.2	AJUSTES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS AL MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO Y AL EMPÍRICO	2-3
6.2.1	Introducción	2-3
6.2.2	Ajustes para las muestras artificiales	2-3
6.2.2.1	Ajuste empírico.....	2-3
6.2.3	Ajustes para las muestras reales	2-5
6.2.3.1	Ajuste empírico.....	2-5
6.2.3.2	Análisis de los parámetros y conclusiones.....	2-23
6.2.3.3	Ajuste teórico.....	2-26
6.3	CURVAS DE CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES PARÁMETROS .. 3-27	
6.3.1	Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión simple	3-27
6.3.1.1	Resistencia a compresión simple en función de la densidad seca y de la porosidad	3-27
6.3.1.2	Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión simple	3-34
6.3.2	Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión isótropa.....	3-35
6.3.2.1	Resistencia a compresión isótropa en función de la densidad seca y de la porosidad	3-35
6.3.2.2	Módulos de elasticidad antes y después del colapso. Relación con la densidad seca.....	3-40
6.3.2.3	Módulos de compresibilidad. Relación con la densidad seca.....	3-42
6.3.2.4	Relación entre la presión isótropa de colapso y la resistencia a compresión simple	3-43
6.4	APÉNDICE 1: AJUSTE EMPÍRICO EN MUESTRAS REALES. CASO ELÍPTICO COLAPSABLE.....	4-46
6.5	APÉNDICE 2: AJUSTE TEÓRICO EN MUESTRAS REALES.....	5-53
6.5.1	Curvas de colapso no asociadas y aditivas.....	5-53
6.5.2	Curvas de fluencia asociadas.	5-57

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestra, por un lado, los ajustes llevados a cabo tanto en las muestras artificiales como las reales; y por otro lado, se presentan una serie de curvas de correlación obtenidas entre diferentes parámetros de las rocas ensayadas, de gran utilidad y aplicación práctica. Estas correlaciones incluyen no sólo los resultados obtenidos con las muestras ensayadas en este trabajo, sino también, resultados obtenidos en trabajos anteriores y por otros autores con muestras de materiales similares, recopilados de la bibliografía.

6.2 AJUSTES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS AL MODELO TEÓRICO ENERGÉTICO Y AL EMPÍRICO

6.2.1 Introducción

A partir de todos los ensayos de resistencia realizados se han hecho varios ajustes de las leyes de resistencia en ejes de Cambridge p y q, definidos como:

$$p = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}, q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

En el caso de las muestras reales, sólo se lleva a cabo los diferentes ajustes en aquellas muestras donde el número de ensayos sea mayor o igual a 3, mínimo un valor de compresión simple, y 2 valores de TIS.

Tanto para las muestras artificiales como las reales, el mejor ajuste se obtuvo mediante el caso Parabólico Colapsable (ajuste empírico). En el apéndice 1 se recogen los ajustes que se obtuvieron para el caso Elíptico Colapsable y en el apéndice 2, se muestran algunos ejemplos de intentos de ajustes al modelo teórico.

6.2.2 Ajustes para las muestras artificiales

6.2.2.1 Ajuste empírico

La forma en la que se realizan estos ajustes se ha descrito en el Capítulo 4.

En la Fig. 6.1 se observan los diferentes ajustes obtenidos en función del valor de λ para el caso Parabólico Colapsable y en la Fig. 6.2 se muestra el ajuste para el caso Elíptico Colapsable.

6.2.2.1.1 Caso Parabólico Colapsable

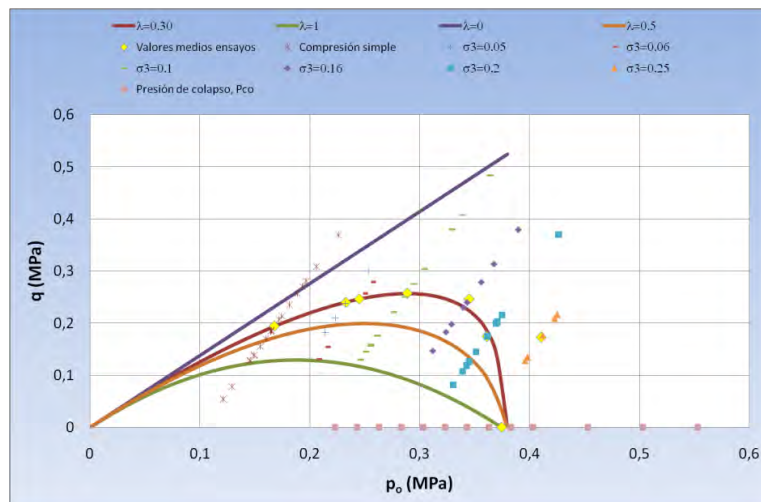


Fig. 6.1: Ajuste para las muestras artificiales. Caso Parabólico Colapsable para diferentes λ y para los valores medios de los ensayos.

La ecuación de la curva de colapso ajustada con criterio Parabólico Colapsable, para los valores medios de los ensayos realizados en las muestras artificiales, es:

$$q = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_{c0}}\right)^\lambda \Rightarrow 1.38(p^* + 0.1) \left(1 - \frac{p^* + 0.1}{0.37}\right)^{0.30}$$

Se obtienen, por tanto, los siguientes parámetros para estas muestras:

- $t = 0.1$ MPa
- $p_{c0} = p_c + t = 0.27 + 0.1 = 0.37$ MPa
- $\lambda = 0.30$
- $M = 1.38$

6.2.2.1.2 Caso Elíptico Colapsable

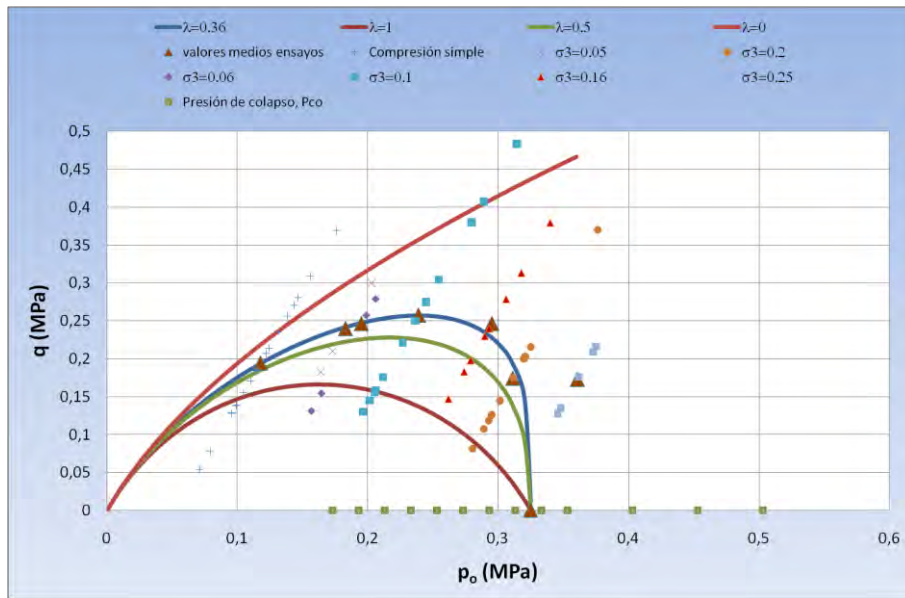


Fig. 6.2: Ajuste para las muestras artificiales. Caso Elíptico Colapsable para diferentes λ y para los valores medios de los ensayos.

La ecuación de la curva de colapso ajustada con criterio Elíptico Colapsable, para los valores medios de los ensayos realizados en las muestras artificiales, es:

$$q^{*2} + 2\beta q^* = 6\beta(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c^* + t}\right)^\lambda \Rightarrow q^{*2} + 2 * 0.18q^* = 6 * 0.18(p^* + 0.05) \left(1 - \frac{p^* + 0.05}{p_c^* + 0.05}\right)^{0.36}$$

Luego se obtienen los siguientes parámetros para estas muestras:

- $t = 0.05$ MPa
- $p_{c0} = p_c + t = 0.27 + 0.05 = 0.32$ MPa
- $\lambda = 0.36$
- $\beta = 0.18$ MPa

Como puede observarse en las figuras anteriores, ambos ajustes, Parabólico

Colapsable y Elíptico Colapsable, se adaptan bastante bien a los valores medios de resistencia obtenidos para estas muestras de piroclastos artificiales.

6.2.3 Ajustes para las muestras reales

6.2.3.1 Ajuste empírico

Este apartado se va a dividir, por un lado, en el ajuste proporcionado por el método de mínimos cuadrados, mediante la utilización de las hojas de cálculo de Excel de Microsoft, el cual ayudó a tener una idea del valor de algunos parámetros necesarios para tantee el ajuste empírico desarrollado en el Capítulo 4, y por otro lado, se presentan los resultados de estos ajustes empíricos obtenidos para cada tipo de muestra ensayada.

También se ajustan otros materiales, como son algunas coladas piroclásticas italianas (Grano Fino, Coladas Amarillas, Coladas Rojas, Puzolana Nera) y dos oleadas piroclásticas japonesas (ambas pertenecientes a Ohya Stone), las cuales se han descrito en el Capítulo 3. Los datos de estas coladas y oleadas han sido tomados de la bibliografía.

6.2.3.1.1 Ajustes proporcionados por el método de mínimos cuadrados

6.2.3.1.1.1 Lapillis (LPT y LPDT)

En la Fig. 5.3 se muestran los ajustes llevados a cabo tanto en las muestras de lapillis soldadas (LPT) como en las lapillis débilmente soldadas (LPDT), separados por número de muestra. Como puede observarse, se obtienen ajustes muy buenos, con coeficientes de correlación muy próximos a la unidad.

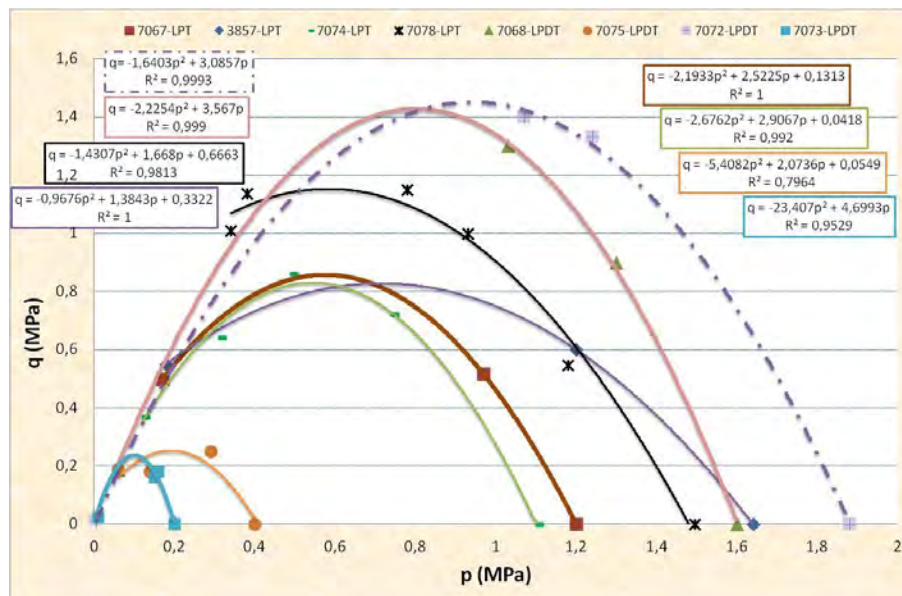


Fig. 5.3: Ajuste para las muestras LPT y LPDT.

6.2.3.1.1.2 Escorias (EST)

Los resultados de los ensayos realizados en las escorias con número de muestra 4381 se recogen en la Fig. 6.4 y además se muestra la ecuación de ajuste junto con el coeficiente de correlación. Como puede verse en la figura, el ajuste obtenido no es muy bueno mediante este método, esto puede ser debido a que como estas muestras presentan un gran tamaño de partículas esto puede dar lugar al efecto escala: el tamaño de las probetas ensayadas es pequeño para este material, dado el gran tamaño de partículas que tiene, por lo que debe ser ensayado o bien in situ o bien con probetas de tamaño muy superior.

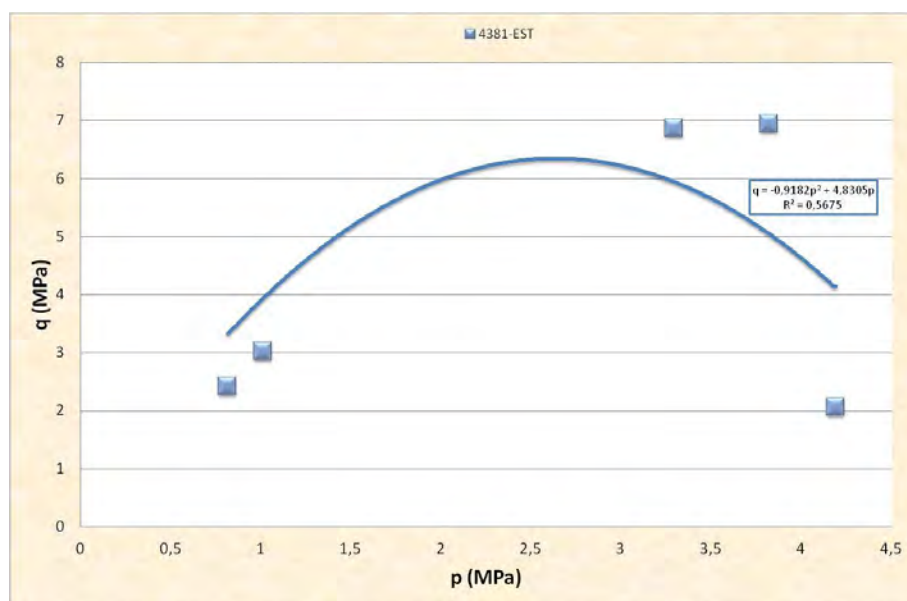


Fig. 6.4: Ajuste en la muestra 4381, la cual corresponde a una Escoria (EST)

6.2.3.1.1.3 Pómez (PZT)

El ajuste de las leyes de resistencia de las pómez (PZT) se recogen en la Fig. 6.5. En esta figura también se representa la ecuación de ajuste y los coeficientes de correlación, las cuales son, como en el caso de las lapillis, muy altos en todos los casos.

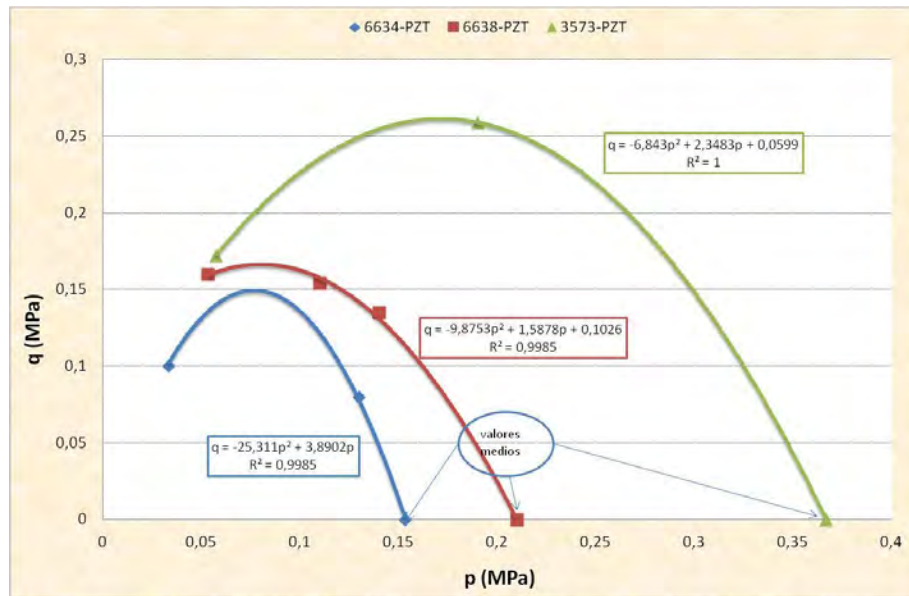


Fig. 6.5: Ajuste en muestras de Pómez, M-6634, M-6638 y M-3573

6.2.3.1.1.4 Cenizas (CBT y CSDT)

En la Fig. 6.6 se recogen los resultados de los ensayos llevados a cabo en muestras de cenizas basálticas (CBT) y en cenizas sálicas débilmente soldadas (CSDT), además se presentan los ajustes obtenidos así como sus correspondientes coeficientes de correlación. En esta figura se observa claramente la diferencia de comportamiento entre las cenizas de composición basálticas y las de composición sálica.

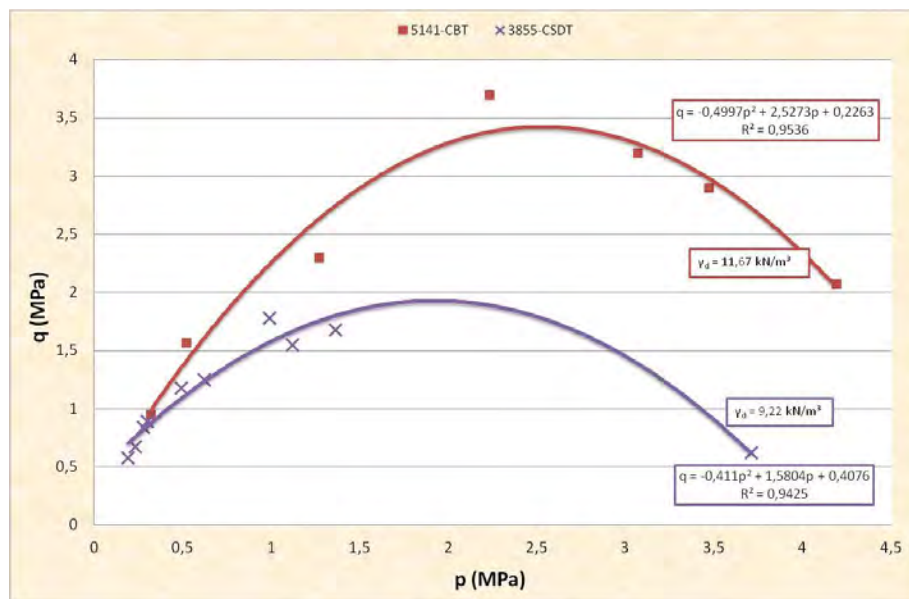


Fig. 6.6: Ajuste en cenizas basálticas (CBT) y en cenizas sálicas débilmente soldadas (CSDT).

6.2.3.1.1.5 Depósitos de piroclastos alterados

- Lapillis alterados, LPT-M

En las Fig. 6.7 y Fig. 6.8 se muestran los ajustes realizados en los lapillis con matriz, que, como se puede ver, presentan un alto coeficiente de correlación. De estos ajustes se concluye que estos materiales alterados, cuyas porosidades reticulares están rellenas por matriz (en diferentes porcentajes), no parecen colapsar al menos hasta presiones muy elevadas (muy por encima del valor de 3.5 MPa, límite de presión de confinamiento de la célula triaxial empleada).

Ello implica que no se tratan de materiales tan peligrosos desde el punto de vista del colapso brusco como es el caso de las lapillis o las pómez.

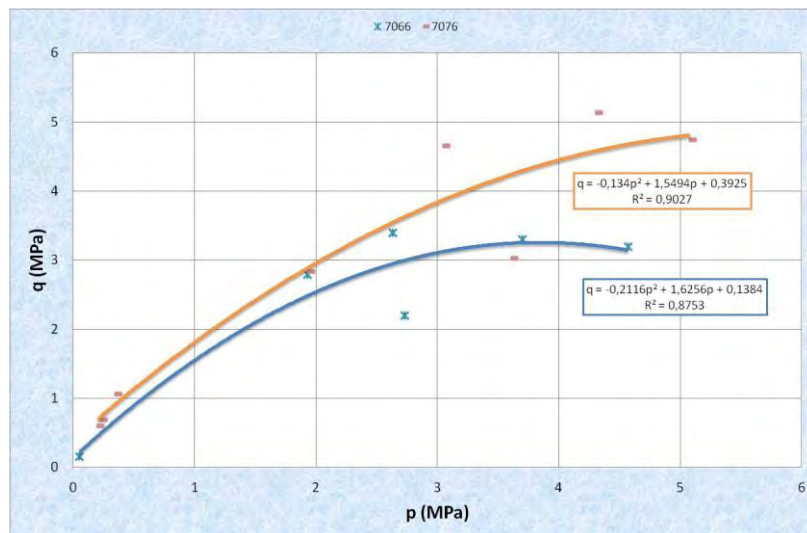


Fig. 6.7: Ajuste en muestras LPT-M: 7066 y 7076.

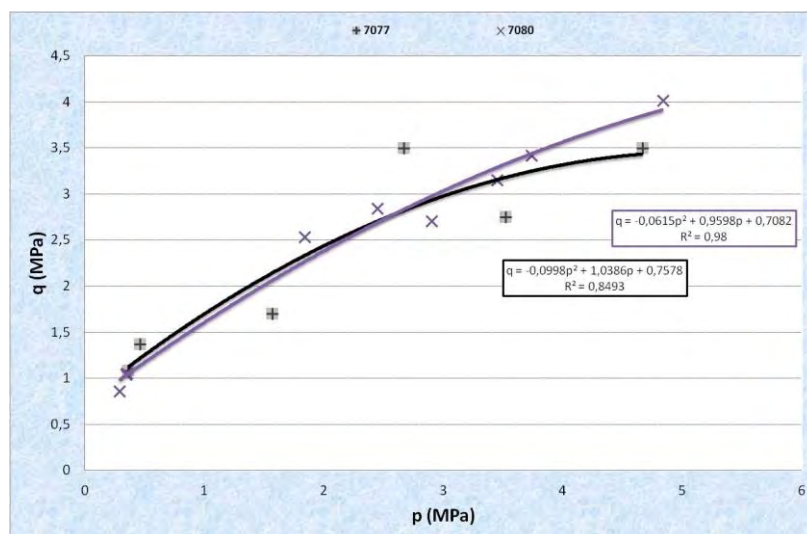


Fig. 6.8: Ajuste en muestras LPT-M: 7077 y 7080.

Caso especial:

La muestra 7079, es un caso especial ya que aunque por su estructura entraría a formar parte de las LPT-M están tan alteradas que su ajuste es difícil de obtener con un valor de seguridad alto. Si se observa la Foto 6.1 y la Foto 6.2, se ve como son unas lapillis que debido a un proceso de alteración presentan matriz arcillosa y además grandes minerales de augita. En la Fig. 6.9 se muestran los resultados obtenidos en estas muestras pero sin ningún ajuste.



Foto 6.1: Muestra 7079. Lapillis muy alterados.

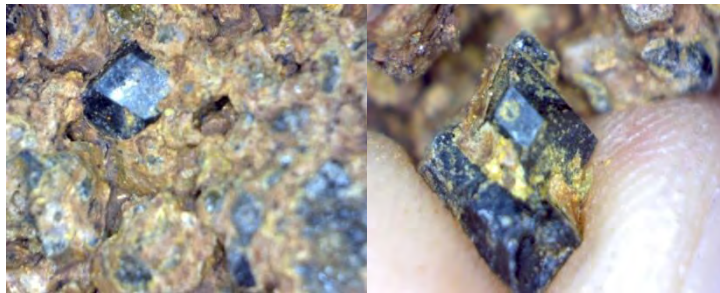


Foto 6.2: Fotografía al microscopio de la muestra 7079. En la foto de la derecha se ve en detalle el tamaño de la augita.

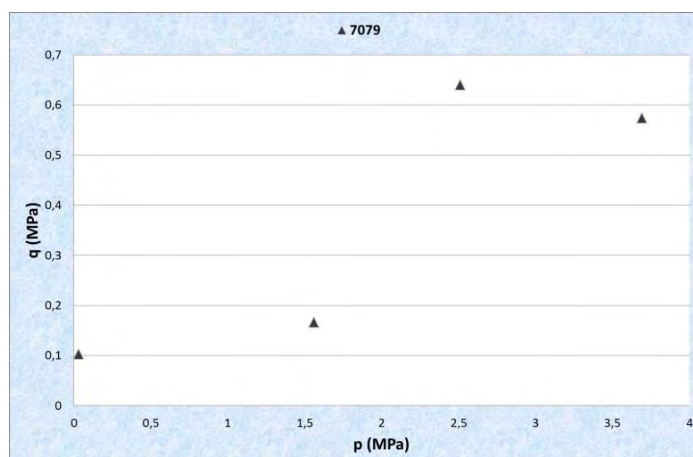


Fig. 6.9: Resultado de los ensayos en la M-7079.

Debido a que no se pudo llegar a una conclusión sobre el comportamiento de esta muestra, no se prosiguió con el ajuste.

- Cenizas sálicas alteradas (con partículas, CST-P) y Pómez alteradas (PZT-M)

En la Fig. 6.10 se muestran los resultados obtenidos y los ajustes realizados para las muestras de cenizas sálicas alteradas (CST-P) y de pómez alterada (PZT-M). Como se observa, en ambos casos se obtienen unos buenos ajustes, con unos coeficientes de correlación próximos a la unidad.

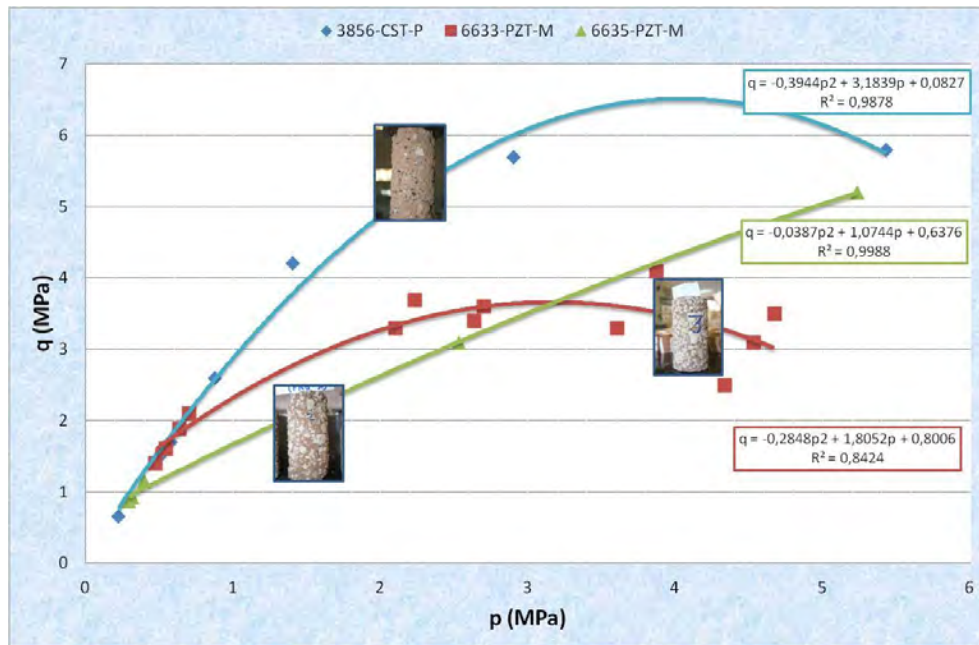


Fig. 6.10: Ajuste en muestras CST-P y PZT-M

6.2.3.1.1.6 Coladas piroclásticas

En las Fig. 6.11 y Fig. 6.12 se muestran los resultados de los ensayos realizados por diferentes investigadores con distintas coladas (Aversa y Evangelista (1993, 1994, 1998), Tommasi y Ribacci (1998, 2002), Cecconi (2001, 2002, 2006, 2007); recogidos en el Capítulo 3).

Se observa que los ajustes realizados por mínimos cuadrados con estas muestras presentan unos coeficientes de correlación muy elevados.

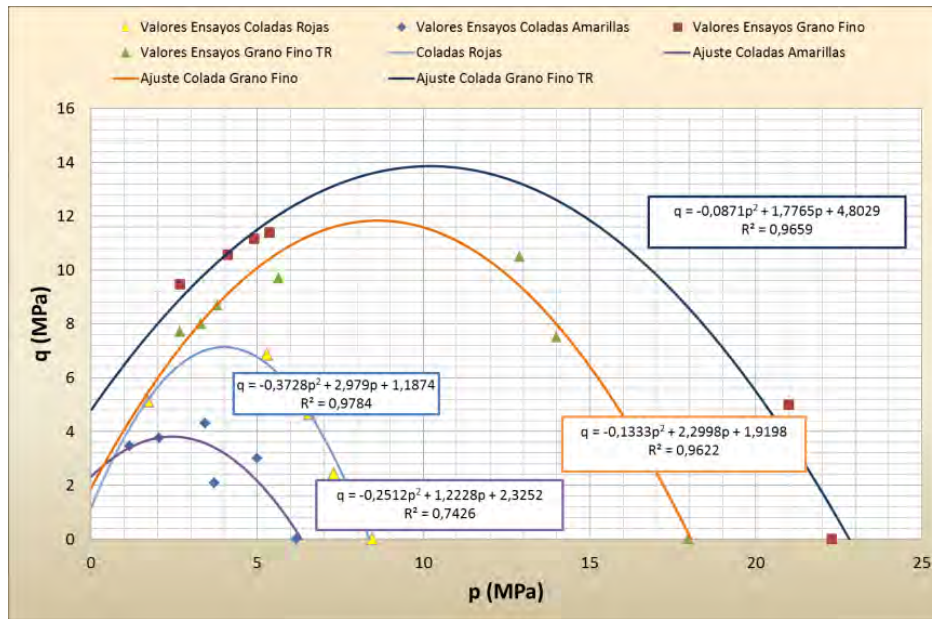


Fig. 6.11: Ajuste en muestras de diferentes coladas, cuyos datos han sido tomados de la bibliografía.

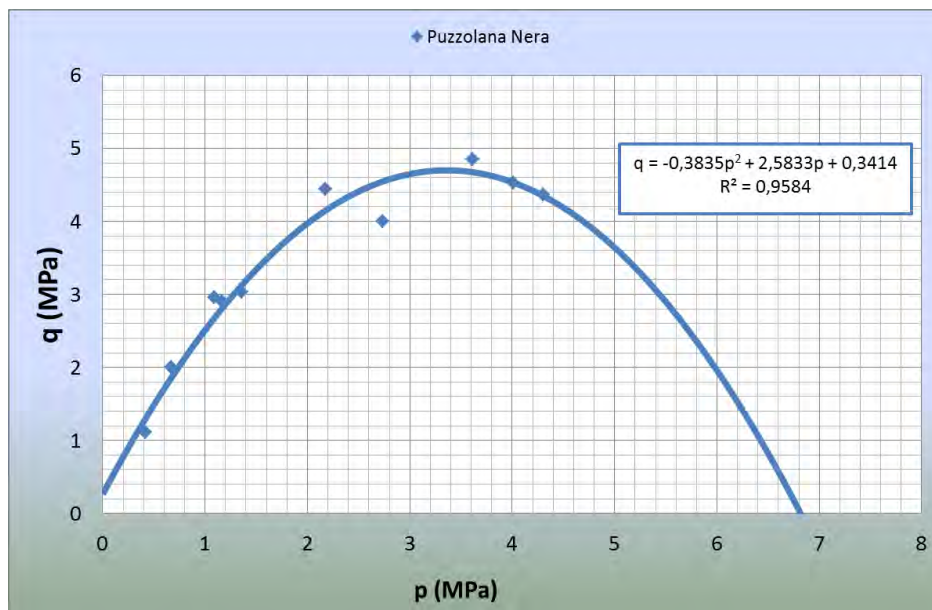


Fig. 6.12: Ajuste en muestras de unas coladas denominadas *Pozzolane Nera*, cuyos datos se han tomado de la bibliografía.

Casos especiales:

En la Fig. 6.13 se recogen los resultados obtenidos con muestras de oleadas piroclásticas de Ohya Stone (Japón, Adachi et al, 1981). En este caso no se ha realizado ningún ajuste, debido al desconocimiento del comportamiento de las mismas en relación a la falta de datos en estos materiales.

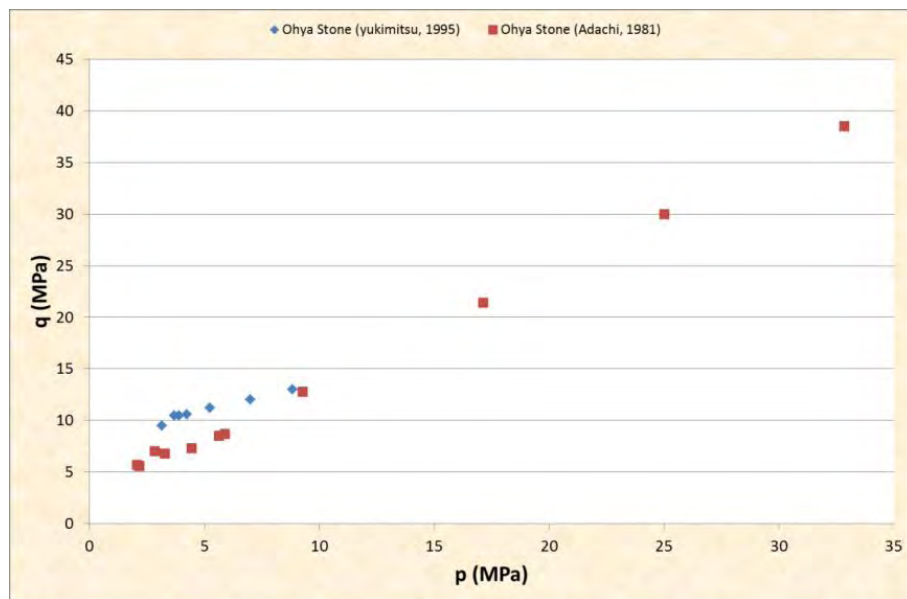


Fig. 6.13: Ensayos en las Oleadas piroclásticas de Ohya Stone.

6.2.3.1.2 Ajuste empírico propuesto

A continuación se van a realizar los ajustes empíricos propuestos y desarrollados en el Capítulo 4, con los mismos resultados de ensayo utilizados en el ajuste por mínimos cuadrados anteriores.

Se han realizado tanto los ajustes con el modelo Parabólico Colapsable como con el Elíptico Colapsable (ver Cap. 4). Se ha observado que, mientras algunas muestras se ajustan bien con ambos modelos, algunas sólo lo hacen bien con el modelo Parabólico Colapsable. Se ha visto, por tanto, que el modelo Parabólico Colapsable es el que mejor se adapta a todas las muestras ensayadas, por lo que se ha elegido como modelo y es el que se utiliza en todos los ajustes presentados en este Capítulo. En el Apéndice 1 se presentan los ajustes que se obtuvieron con el modelo Elíptico Colapsable.

A continuación se van a presentar las diversas curvas tipo Parabólico Colapsable obtenidas en los diferentes ajustes llevados a cabo en los piroclastos canarios junto con la densidad de cada muestra y su porosidad. Los valores de presión de colapso que aparecen en las gráficas resaltados con una elipse, son aquellos que se han obtenido mediante el ajuste, no son valores de ensayos ya que el equipo que se utilizó para esta investigación tiene una presión de confinamiento máxima de 3.5 MPa.

- Ajuste de las pómez soldadas (PZT)

En la Fig. 6.14 se muestran las curvas de colapso ajustadas mediante el método propuesto para tres muestras de pómez. Como se observa, se obtienen unos ajustes

muy buenos a los puntos de ensayo. Para las muestras 6638 y 6634 se observa que la presión de colapso aumenta con el incremento de la densidad y la disminución de la porosidad. Estas muestras presentaban un tamaño de partículas parecido. En cuanto a la 3573, el tamaño de partículas era considerablemente mayor que las dos muestras anteriores y este puede ser la causa por la que aun teniendo una porosidad y densidad ligeramente menor que la 6638, su presión de colapso sea mayor, ya que en el ensayo de compresión isotrópica el factor más influyente, como se ha indicado anteriormente, es la resistencia de las partículas.

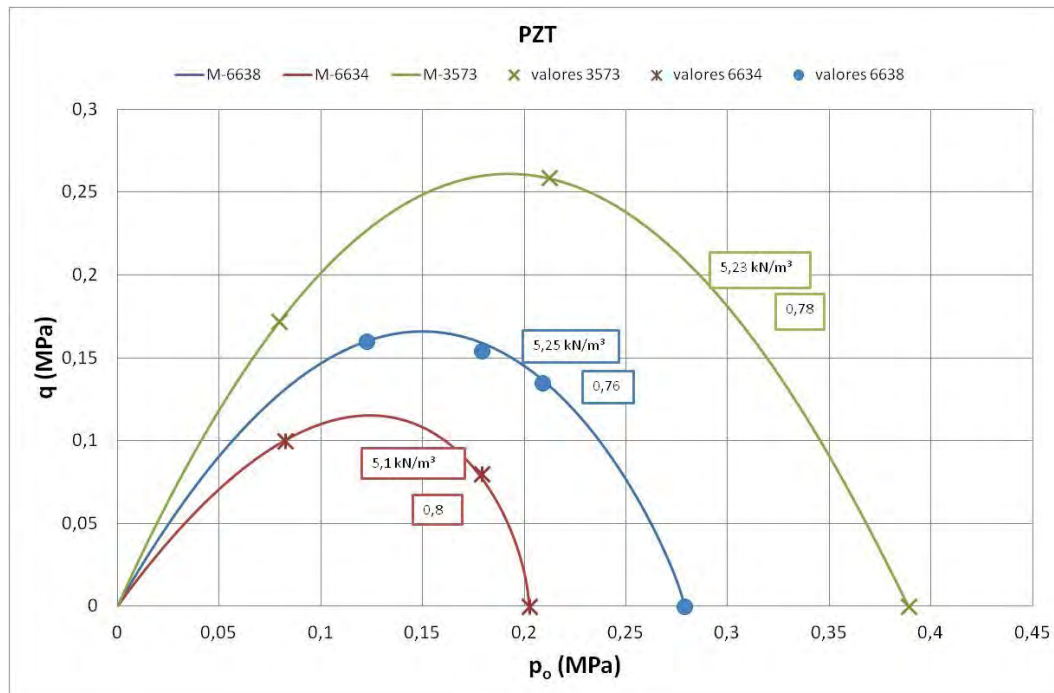


Fig. 6.14: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las pómez soldadas. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las pómez alteradas (PZT-M)

La Fig. 6.15 presenta las curvas de colapso obtenidas para las muestras de pómez con matriz (PZT-M). Como se observa, se obtienen unos ajustes muy buenos a los puntos de ensayo. En este grupo la característica más destacada es el tamaño de las partículas de pómez, el cual aumenta de la M-4386 a la 6633 de manera muy significativa, y por tanto se traduce en una disminución de la densidad y un aumento de la porosidad.

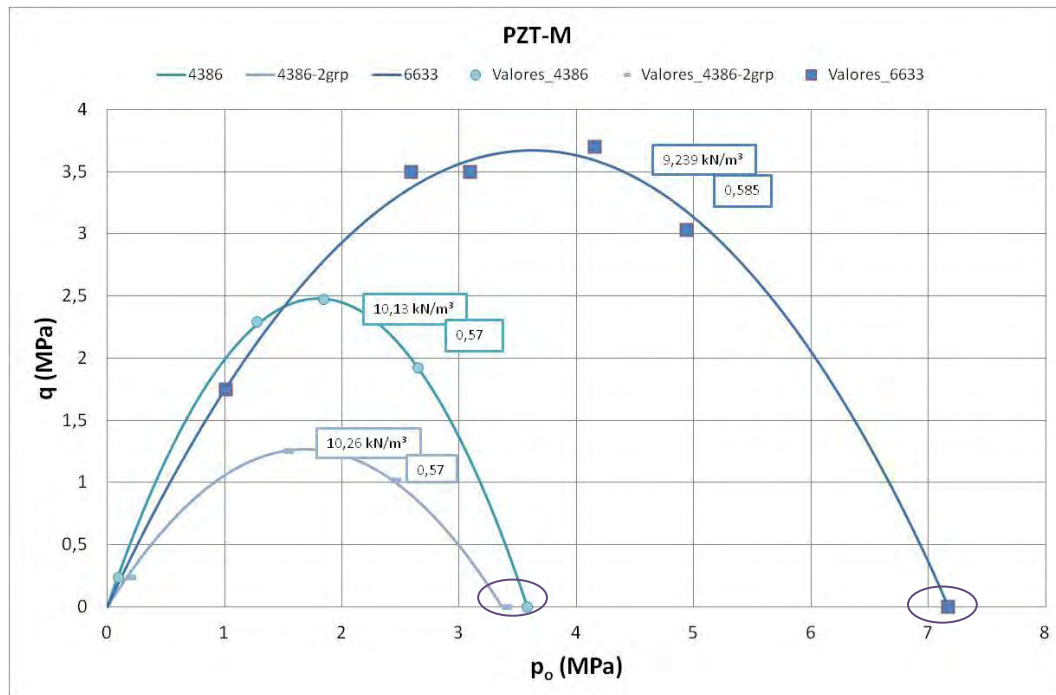


Fig. 6.15: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las pómez con matriz. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las lapillis soldadas (LPT)

En las lapillis, la presión de colapso, en general, aumenta con la disminución de la porosidad y con el aumento de la densidad (Fig. 6.16). La M-7078 tiene un tamaño de partículas ligeramente mayor que la M-3857. La M-7067 tiene un grado de soldadura mayor y un tamaño de partículas ligeramente mayor y más variado que la M-7074. Al igual que en las muestras anteriores, se obtienen unos ajustes muy buenos a los puntos de ensayo.

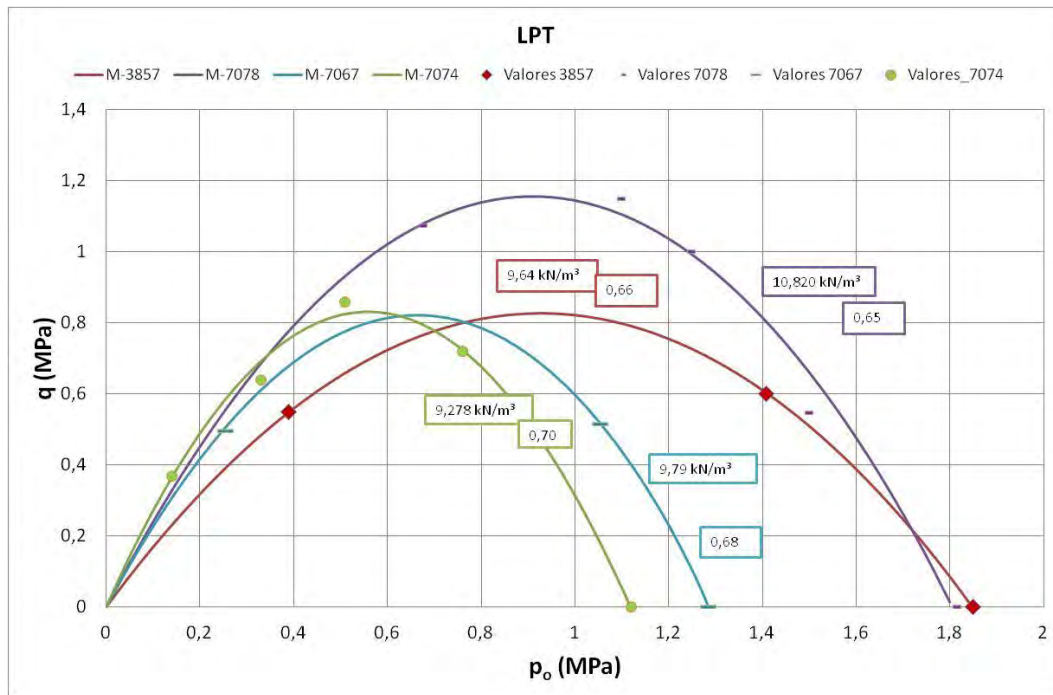


Fig. 6.16: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las lapillis soldadas. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajustes de las lapillis débilmente soldadas (LPDT)

Para el caso de las lapillis débilmente soldadas (Fig. 6.17), se puede ver claramente una relación entre la porosidad, la densidad y la presión de colapso. Al aumentar la densidad y disminuir la porosidad se produce un aumento de la presión de colapso. Además en la Fig. 6.17 de las muestras con menor presión de colapso a las de mayor se produce una disminución del tamaño de las partículas. También en este caso se obtienen unos ajustes muy buenos a los puntos de ensayo.

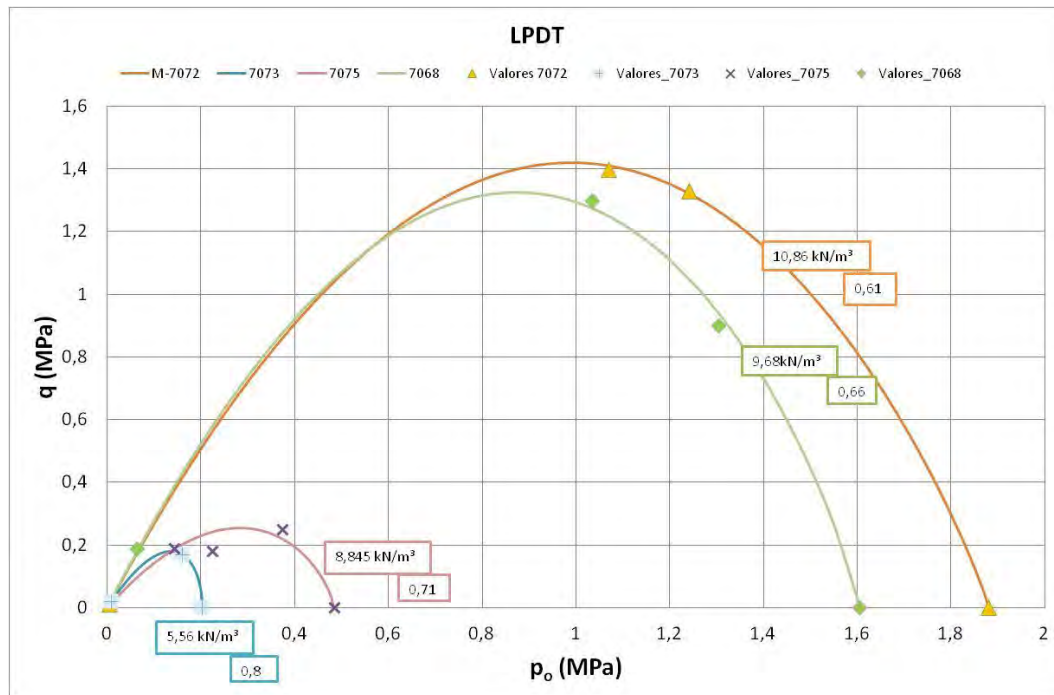


Fig. 6.17: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las lapillis débilmente soldadas. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las lapillis alteradas (LPT-M)

En la Fig. 6.18 se muestran los ajustes de las lapillis alteradas. Las presiones de colapso que aparecen en estas curvas han sido las obtenidas mediante los ajustes, ya que son valores superiores a los 3.5 MPa, capacidad máxima de presión de confinamiento del equipo utilizado. Como se indicó anteriormente, la alteración de las muestras hace que éstas sean menos colapsables, aumentando los valores de la presión de colapso y haciendo que la variación de la deformabilidad del material se produzca de forma menos brusca, probablemente debido al relleno matricial que se va produciendo en los macroporos de los materiales.

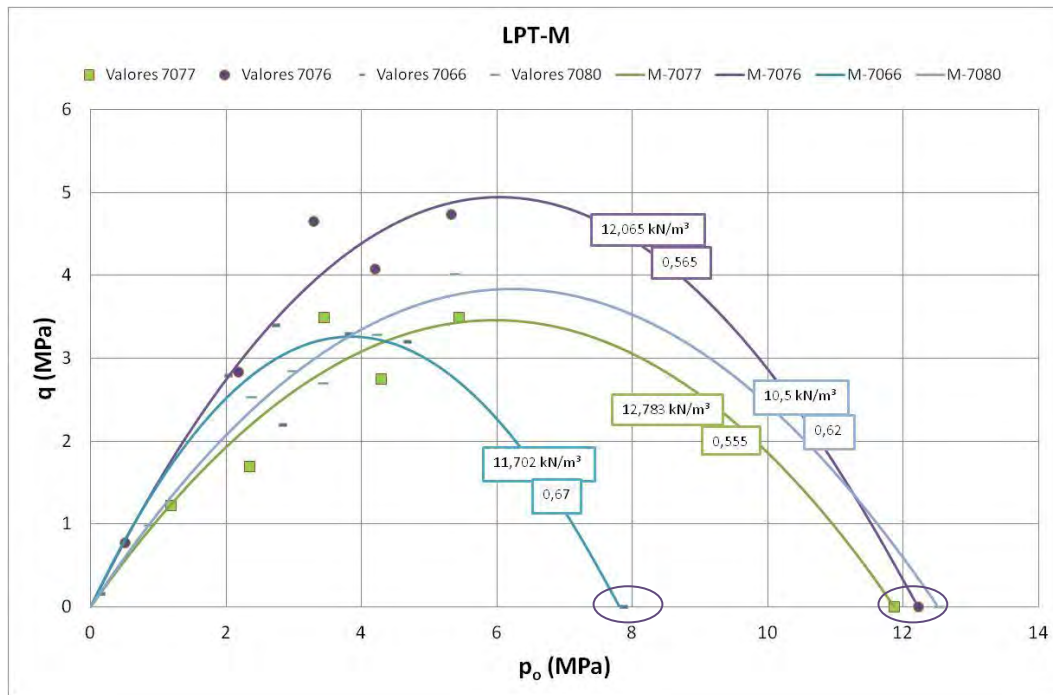


Fig. 6.18: Curvas de colapso, tipo Parábola Colapsable, para las lapillis con matriz. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las escorias soldadas (EST)

En las escorias, cuya porosidad es del tipo vacuolar, el ajuste obtenido es el que presenta el valor más bajo del parámetro λ . Esto puede ser debido al tipo de porosidad, al tamaño de partículas y al tipo de soldadura. No se tienen suficientes datos para estudiar su comportamiento. Los valores obtenidos de la presión de colapso han sido deducidos también en este caso de los ajustes realizados.

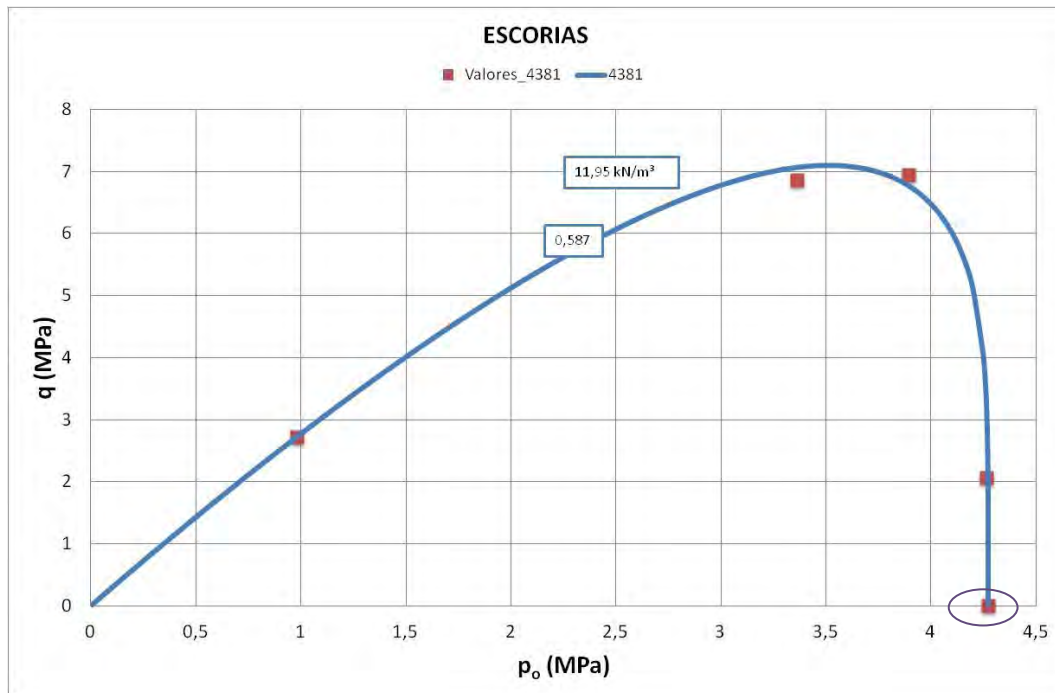


Fig. 6.19: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para el caso de la escoria 4381. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las cenizas soldadas, básicas y sálicas (CBT-CST)

En la Fig. 6.20 se muestran los ajustes de las cenizas soldadas, tanto básicas como sálicas. Los valores obtenidos de las presiones de colapso han sido deducidos también en este caso de los ajustes realizados.

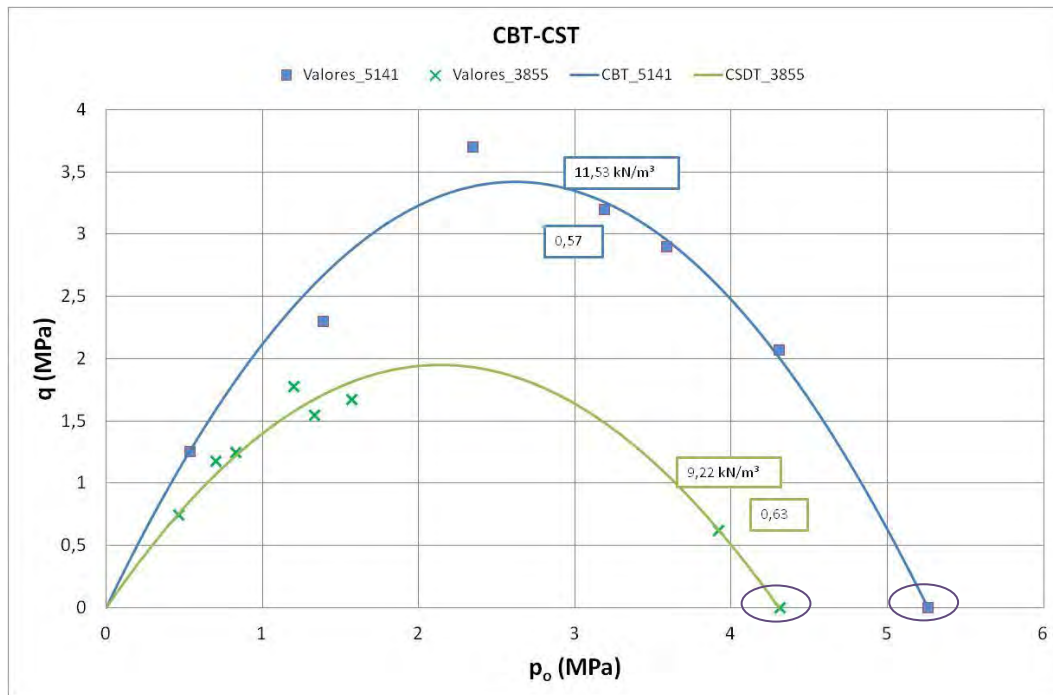


Fig. 6.20: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las cenizas basálticas soldadas (CBT) y las cenizas sálicas soldadas (CST). En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Ajuste de las cenizas sálicas alteradas (CST-P)

En la Fig. 6.18 se muestran los ajustes de las cenizas sálicas alteradas. El valor obtenido de la presión de colapso ha sido también deducido en este caso de los ajustes realizados.

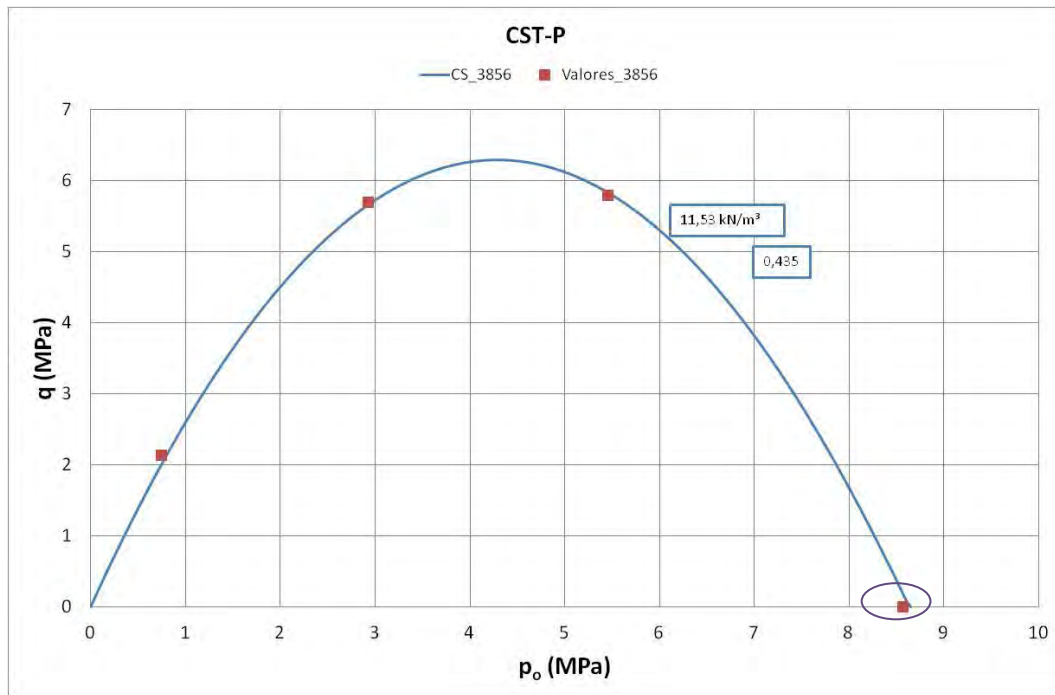


Fig. 6.21: Curvas de colapso, tipo Parabólico Colapsable, para las cenizas sálicas con partículas. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

- Coladas piroclásticas

En la Fig. 6.22 se muestran los ajustes realizados con el método propuesto con los resultados de ensayos realizados en diferentes tipos de colada, recogidos de la bibliografía y citados en el Capítulo 3.

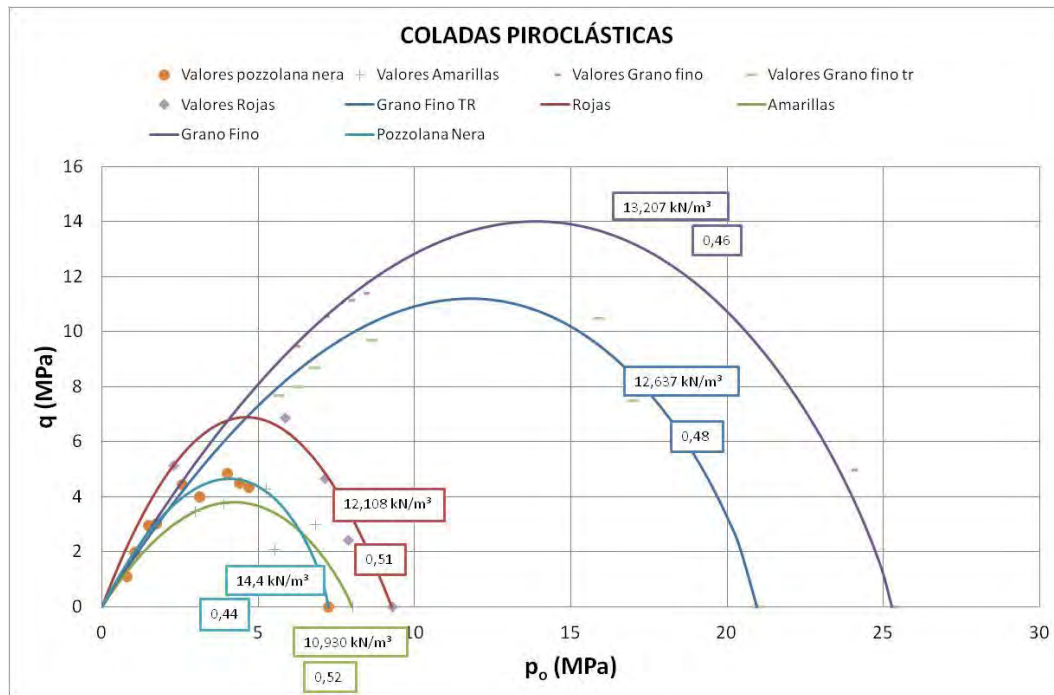


Fig. 6.22: Curvas de colapso tipo Parabólico Colapsable, para las coladas piroclásticas. En los rectángulos aparecen los valores de densidad y porosidad.

Se observa que las coladas piroclásticas presentan criterios de rotura del mismo tipo que los piroclastos de caída, si bien con unas mayores resistencias.

➤ Resumen de los resultados y parámetros deducidos:

En la Tabla 6.1, se recogen los diferentes valores de los parámetros de la curva de colapso para Parabólico Colapsable. Además en esta tabla aparece el valor de δ (Serrano y Olalla, 1994), el cual relaciona la tensión de tracción, t , con la presión de colapso, como se vio en el Capítulo 4, de modo que $p_0 = p + \delta$.

Tabla 6.1: Valores de los parámetros para el ajuste del tipo Parabólico Colapsable

$q = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c + t} \right)^\lambda$						
Tipo	Muestras	M	λ	t (MPa)	P _{co} (MPa)	$\delta = t/p_{co}$ (%)
LPT	3857	1.78	1	0.21	1.85	11.35
	7074	2.97	1	0.02	1.12	1.79
	7078	2.53	0.98	0.31	1.81	17.13
	7067	2.44	0.93	0.08	1.28	6.25

$q = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c + t} \right)^\lambda$						
Tipo	Muestras	M	λ	t (MPa)	P _{co} (MPa)	$\delta = t/p_{co}$ (%)
LPDT	7068	2.93	0.83	0.004	1.60	0.25
	7075	1.66	0.71	0.08	0.48	16.67
	7072	2.81	0.90	0.0003	1.88	0.02
	7073	2.30	0.50	0.002	0.20	1.00
PZT	6634	1.68	0.63	0.05	0.20	25.00
	6638	2.15	0.86	0.07	0.28	25.00
	3573	2.73	1.02	0.02	0.39	5.13
EST	4381	2.94	0.22	0.07	4.41*	1.59
LPT-M	7066	1.71	0.99	0.04	7.81*	0.51
	7076	1.64	1	0.23	12.22*	1.88
	7077	1.16	1	0.77	11.86*	6.49
	7080	1.23	1	0.53	12.52*	4.23
PZT-M	4386	2.75	0.99	0.009	3.58*	0.25
	4386-2blq	1.51	1	0.09	3.37*	2.67
	6633	2.02	0.98	0.42	7.17*	5.86
CBT	5141	2.62	1	0.12	5.26*	2.28
CSDT	3855	1.83	1	0.21	4.31*	4.87
CST-P	3856	2.94	1	0.09	8.64*	1.04
COLADAS PIROCLASTICAS	Rojas	2.99	1	0.57	9.27	6.15
	Amarillas	1.77	0.89	1.82	8	22.75
	Puzolana Nera	2.17	0.78	0.37	7.24	5.11
	Grano Fino TR	1.81	0.78	2.98	20.95	14.22
	Grano Fino	1.94	0.82	2.98	25.27	11.79

* Presiones de colapso obtenidas mediante ajuste.

6.2.3.2 Análisis de los parámetros y conclusiones

En la Tabla 6.2 se muestran los rangos para el parámetro δ , en porcentaje (tomando como valor del 100% una $p_c=1$).

Tabla 6.2: Rango de valores para el parámetro δ , en porcentaje.

MATERIAL	RANGO (%)	MEDIA (%)	VALOR INGENIERIL (%)
LPT	1.8-17.1	9.1	9
LPDT	0-16.7	4.5	5
PZT	5.1-25	18.4	18
EST	1.6	1.6	1.6
LPT-M	0.5-6.5	3.3	3
PZT-M	0.3-5.9	2.9	
CBT	2.3	2.3	2
CSDT	4.9	4.9	5
CST-P	1	1	1
COLADAS ROJAS	6.1	6.1	6
COLADAS AMARILLAS	22.7	22.7	23
POZZOLANA NERA	5.1	5.1	5
GRANO FINO	11.8-14.2	13	13

A continuación, en las Tabla 6.3 y Tabla 6.4 se recogen los valores los parámetros λ y M obtenidos para cada tipo de material, su media y el valor que se debe utilizar para estos materiales desde un punto de vista ingenieril.

Tabla 6.3: Rango de valores para el parámetro λ .

MATERIAL	λ		
	RANGO	MEDIA	VALOR INGENIERIL
LPT	0.93-1	0.98	1
LPDT	0.50-0.9	0.7	0.7
PZT	0.63-1.02	0.84	0.8
EST	0.22	0.22	0.22
LPT-M	0.99-1	1	1
PZT-M	0.98-1		
CBT	1		
CSDT	1		
CST-P	1		
COLADAS ROJAS	1		
COLADAS AMARILLAS	0.89	0.89	
POZZOLANA NERA	0.78	0.78	0.8
GRANO FINO	0.82	0.82	0.8

Tabla 6.4: Rango de valores para el parámetro M.

MATERIAL	M			$\sin \rho = \frac{\rho_0}{3M/6 + M}$
	RANGO	MEDIA	VALOR INGENIERIL	
LPT	1.78-2.97	2.43	2.4	59°
LPDT	1.66-2.93	2.42	2.4	59°
PZT	1.68-2.73	2.2	2	48.6°
EST	2.94	2.94	3	90°
LPT-M	1.16-1.71	1.43	1.4	34.6°
PZT-M	1.51-2.75	2.1	2	48.6°

MATERIAL	M		VALOR INGENIERIL	$\sin \rho = \frac{\rho_0}{3M/6 + M}$
	RANGO	MEDIA		
CBT	2.62	2.62	2.6	65°
CDST	1.83	1.83	1.8	43.8°
CST-P	2.94	2.94	3	90°
COLADAS ROJAS	2.99	2.99	3	90°
COLADAS AMARILLAS	1.77	1.77	1.8	43.8°
POZZOLANA NERA	2.17	2.17	2	48.6°
GRANO FINO	1.81-1.94	1.87	2	48.6°

Recopilando los resultados anteriores y a modo de resumen, en la Tabla 6.5 se exponen los valores que se recomienda utilizar para proyectos en materiales volcánicos de baja densidad, cuando no se pueda disponer de ensayos que permitan obtener estos valores para cada material concreto.

Tabla 6.5: Recomendaciones de proyecto

MATERIAL (densidad, kN/m³)	M	δ (%)	λ
LPT (8-18)	2.4	9	1
LPDT (5-10.5)	2.4	5	0.7
PZT (5-7)	2	18	0.8
EST (9-13)	3	1.6	0.22
LPT-M (9-18)	1.4	3	1
PZT-M (8-13)	2		1
CBT (15-23)	2.6	2	1

MATERIAL (densidad, kN/m³)	M	δ (%)	λ
CSDT (>9)	1.8	5	1
CST-P (10-17)	3	1	1
COLADAS ROJAS (12)	3	6	1
COLADAS AMARILLAS (10)	1.8	23	1
POZZOLANA NERA (14)	2	0.05	0.8
GRANO FINO (12-13)	2	0.13	0.8

6.2.3.3 Ajuste teórico

Ver Apéndice 2.

6.3 CURVAS DE CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES PARÁMETROS

6.3.1 Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión simple

6.3.1.1 Resistencia a compresión simple en función de la densidad seca y de la porosidad

En la Fig. 6.23 se muestran los resultados de los ensayos de compresión simple (σ_c) en función de la densidad seca (γ_d) para cada grupo de muestras estudiadas. Como puede observarse existe una clara relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca de los materiales: cuanto mayor es la densidad seca mayor es la resistencia.

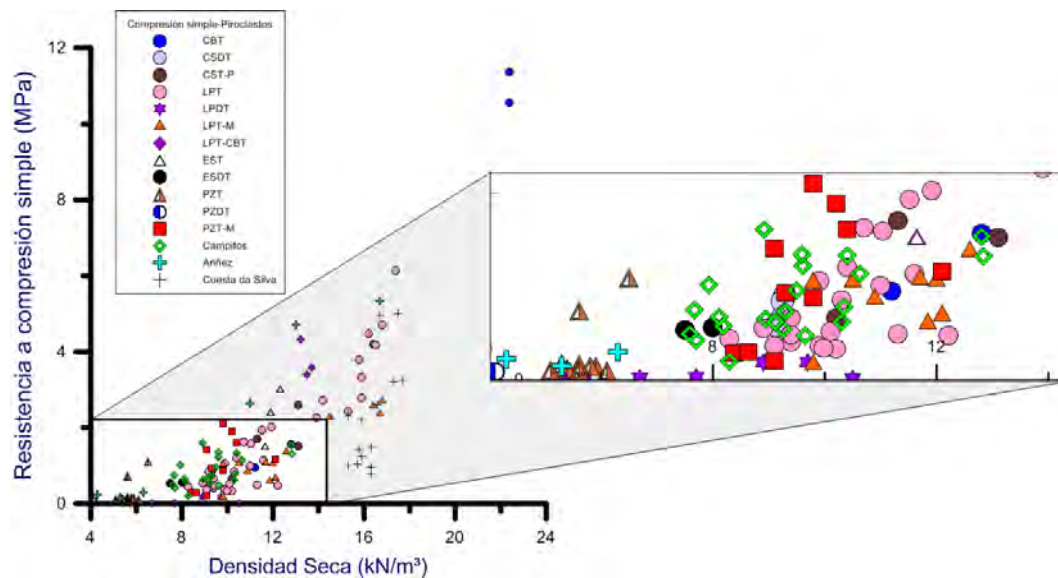


Fig. 6.23: Relación entre la resistencia a compresión simple (σ_c) de cada grupo estudiado con la densidad seca (γ_d). En esta gráfica se muestran los resultados de 136 ensayos llevados a cabo tanto en esta investigación como otros realizados en el año 2007 (CEDEX, 2007; Serrano et al. 1976) y anteriormente (Ariñez y Campitos, Serrano et al. 1976).

Esta es una tendencia general en todas las rocas y en particular en las rocas volcánicas, como puede verse en la Fig. 6.24 (modificada de Serrano et al. 2007) en la que se recogen las resistencias de las 136 muestras de la Fig. 6.23 junto con otras 120 muestras de rocas volcánicas de mayor densidad procedentes todas ellas de las Islas Canarias. La nomenclatura de estas rocas se encuentra definida por Rodríguez-Losada et al, 2007. Se trata de basaltos, traquibasaltos, traquitas y fonolitas (Serrano et al.2007). Además en la Fig. 6.24 se observan dos grupos, aquellos que tienen una densidad mayor de unos 9 kN/m³, cuyos valores de compresión simple, por encima de los 0.4 MPa, aumentan de manera exponencial, y aquellos que tienen una

densidad menor a unos 9 kN/m³ con valores de resistencia a compresión simple menores de 0.4MPa, que presentan una elevada dispersión (esto puede ser debido a la porosidad y grado de soldadura) y su tendencia no es muy clara aunque parece que en general aumentan con la densidad.

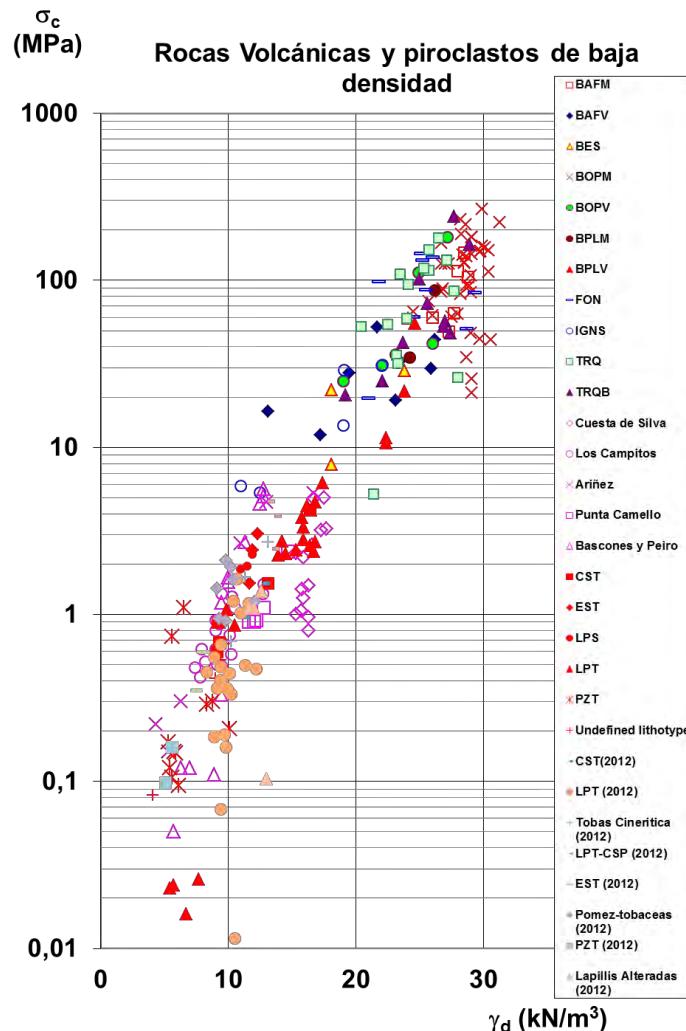


Fig. 6.24: Relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca de diferentes rocas volcánicas y piroclastos de baja densidad (modificada de Serrano et al.2007). N° total de muestras: 256.

Como puede verse, los piroclastos de caída presentan una elevada dispersión en la vertical, es decir, para un mismo valor de densidad (refiriéndose a un mismo material) existe una variación entre los valores de la compresión simple.

Un caso particular es el de las lapillis: si se observan en la Fig. 6.25 las muestras 7075 y 3857, para el caso de las que tienen más baja resistencia, y las muestras 7078 y 7067, para las de mayor resistencia, se ve como ocurre lo descrito anteriormente. Es decir, para densidades similares se obtienen diferentes valores de resistencia a

compresión simple. Una manera de explicar esto es observando las muestras al microscopio y detallando la estructura de las mismas. Al observar las fotos al microscopio de cada grupo (Foto 6.3 y Foto 6.4) se ve que las muestras se diferencian por sus tamaños de partículas y por su grado de soldadura, esta última se cree que es la característica que más influyente en la resistencia a compresión simple de los piroclastos de baja densidad. La muestra 7075 presenta un valor de compresión simple más bajo que la muestras 3857 aunque sus densidades son similares, esto es debido a que el grado de soldadura de la muestra 7075, como puede verse en la Foto 6.3, es más bajo que la 3857. Lo mismo ocurre con las muestras 7078 y 7067. Aunque presentan densidades similares, la 7078 tiene una resistencia a compresión simple mayor que la 7067 y esto es debido a que su grado de soldadura es mayor (Foto 6.4).

De estos resultados se concluye que bajo compresión uniaxial, la característica más influyente en la resistencia de estos tipos de materiales es el grado de soldadura.

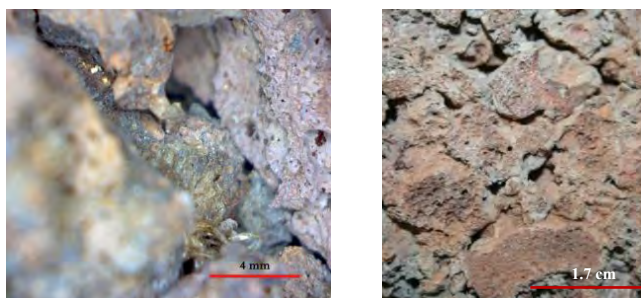


Foto 6.3: De izquierda a derecha: muestras M-7075 y M-3857.

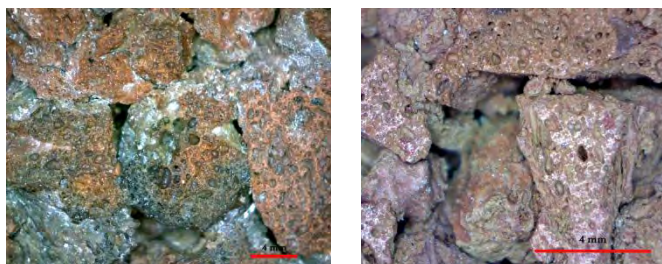


Foto 6.4: De izquierda a derecha: muestras M-7078 y M-7067.

Otros casos singulares son las muestras 7074, 7068 y 7072 (Fig. 6.25). Estas muestras, como puede verse en las Foto 6.5, presentan una alteración que va aumentando desde la 7074 hasta la 7072, sus resistencias a compresión simple son menores que la que deberían de presentar por sus densidades, y esto se refleja de manera más pronunciada en las muestras 7072 y 7068, lo que puede indicar que lo que recubre las partículas en la muestra 7072 tiene una baja resistencia.

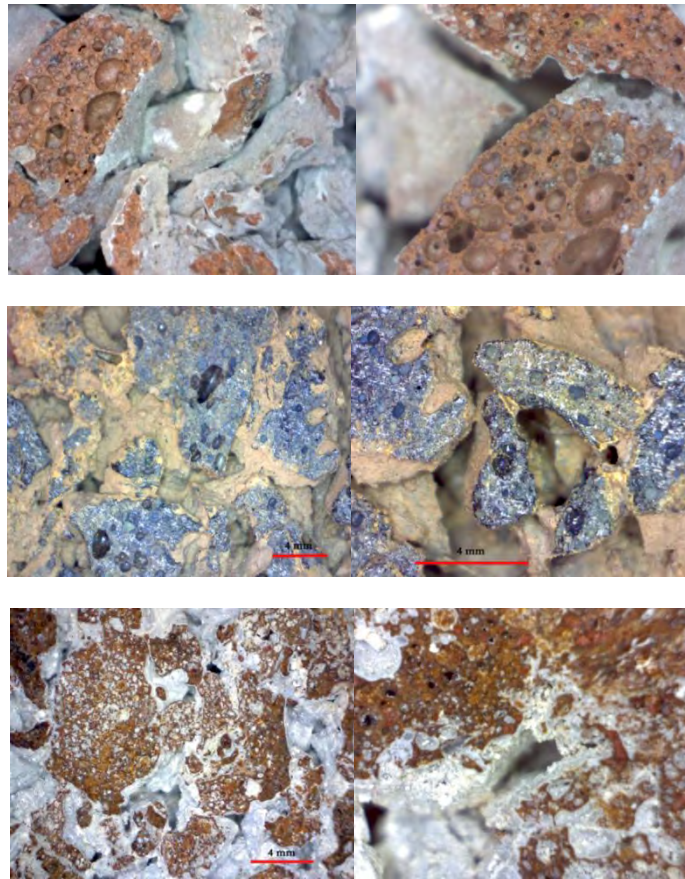


Foto 6.5: De arriba abajo: M-7074, M-7068, M-7072.

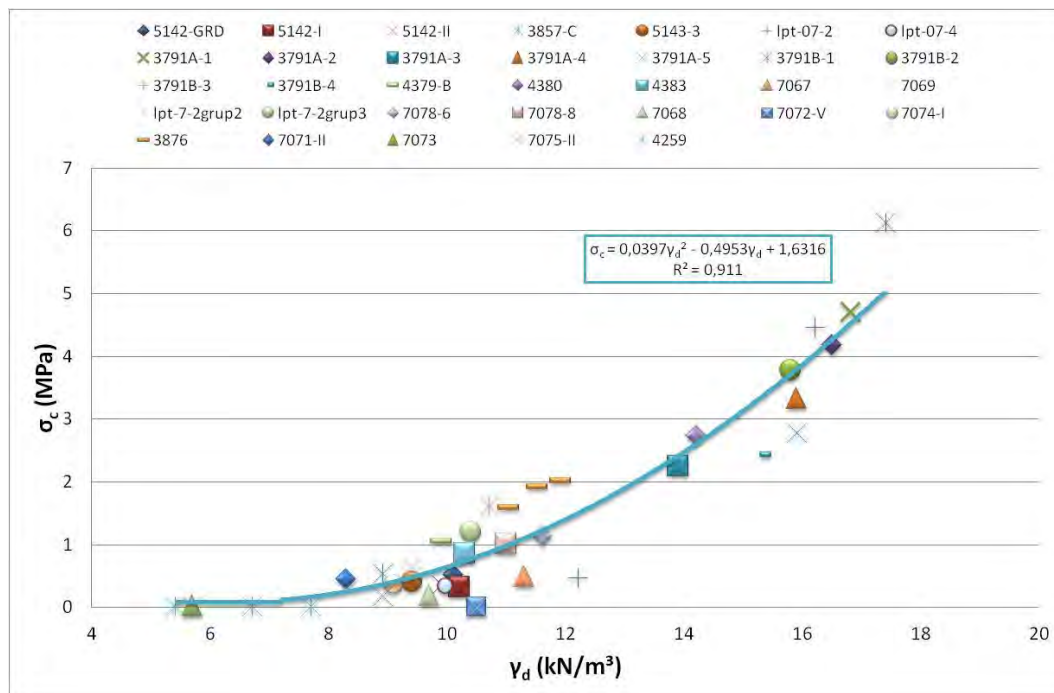


Fig. 6.25: Relación entre la resistencia a compresión simple (σ_c) y la densidad seca (γ_d) de las lapillis. En esta gráfica se incluyen los datos de las M-7072, M-7074 y M-7068 que aunque son muestras alteradas se van a poner de ejemplo a continuación. El ajuste obtenido no incluye dichas muestras alteradas.

La resistencia a compresión simple también está relacionada con la porosidad, de forma que a mayor porosidad menor resistencia (Fig. 6.26). Debido al elevado rango de porosidades que se puede encontrar en las lapillis, su resistencia a compresión simple es muy variable, estando comprendida, en las muestras analizadas, entre 0.0117 y casi 6 MPa.

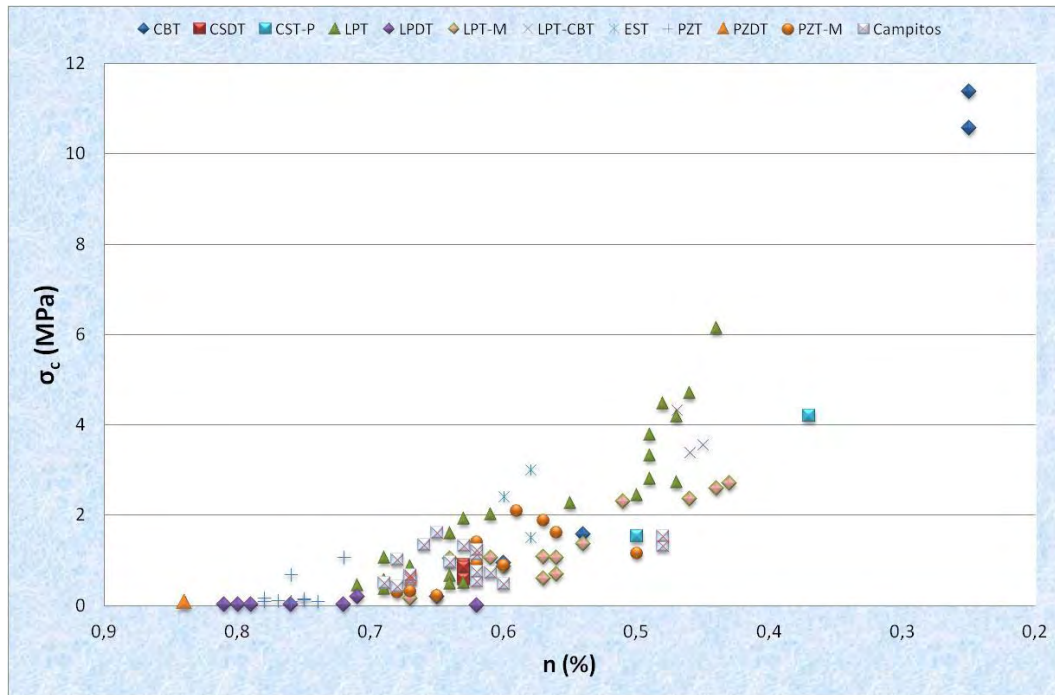


Fig. 6.26: Relación entre la resistencia a compresión simple y la porosidad en piroclastos de baja densidad procedentes de diferentes partes de las Islas Canarias. La porosidad se obtuvo de la relación $n = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d$.

Por otra parte, como puede verse en la Fig. 6.27, las coladas piroclásticas también presentan una relación similar entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca así como entre la resistencia y su porosidad (Fig. 6.28). Los datos de estas coladas han sido tomados de diferentes estudios referidos en el Capítulo 3.

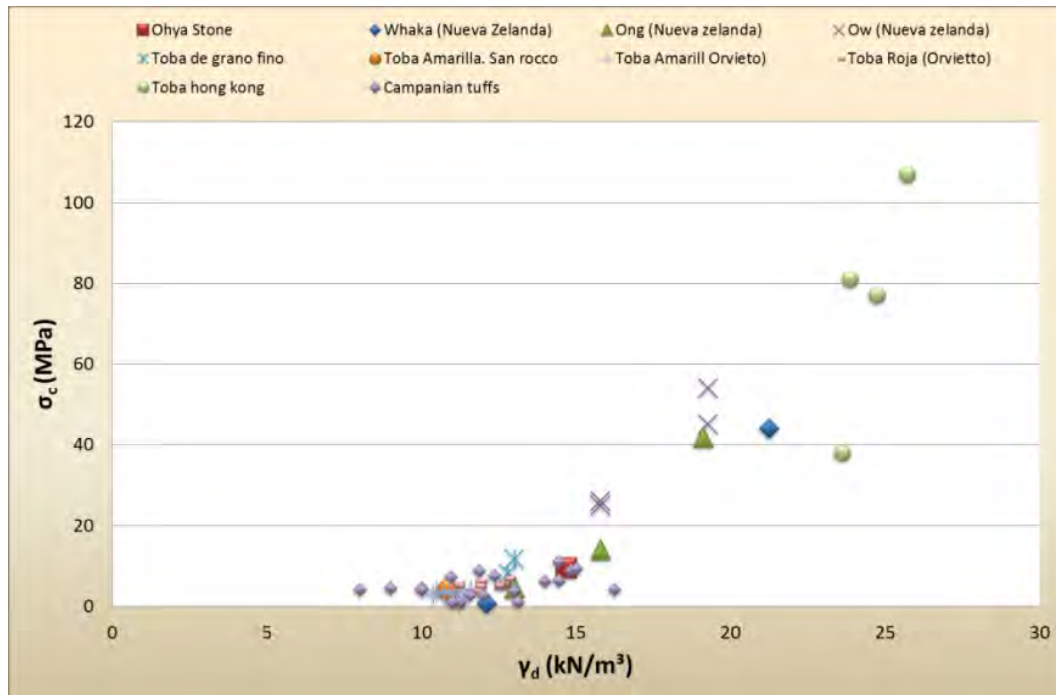


Fig. 6.27: Resultados de ensayos de compresión simple en diferentes coladas piroclásticas. Estos datos fueron obtenidos de estudios publicados en diferentes países y los cuales están resumidos en el Capítulo 3. Corresponde a un total de 54 ensayos.

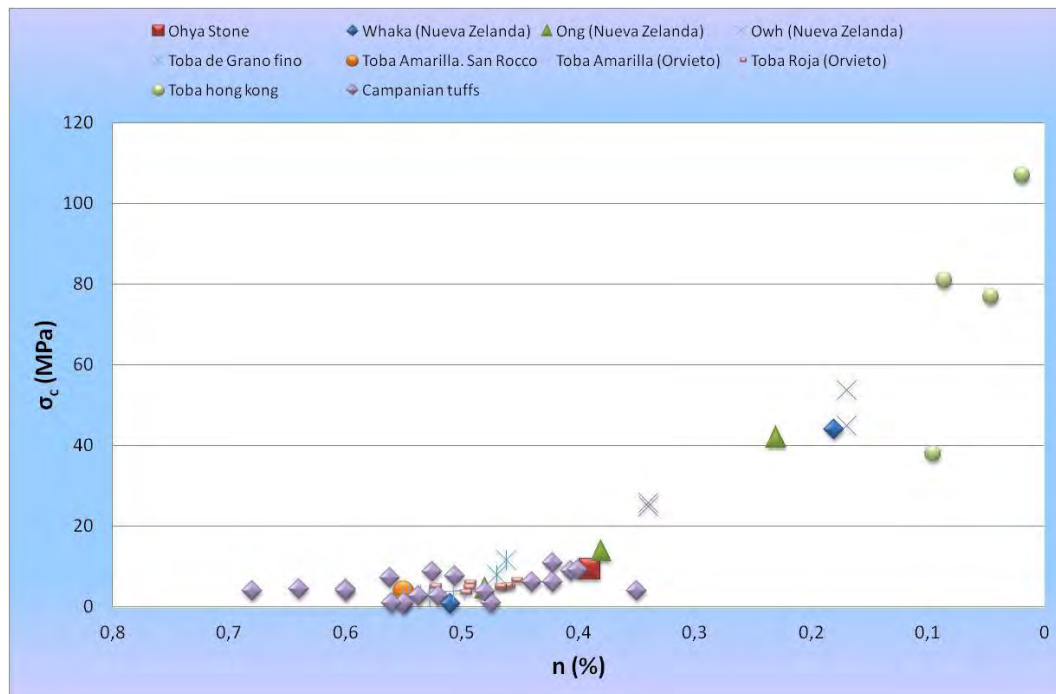


Fig. 6.28: Relación entre la porosidad y la resistencia a compresión simple de diferentes coladas piroclásticas y alguna oleada piroclástica (Ohya Stone). Estos datos fueron obtenidos de estudios publicados en diferentes países y los cuales están resumidos en el Capítulo 3. Corresponde a un total de 54 ensayos.

En la Fig. 6.29 se han recopilado conjuntamente los resultados, tanto de los piroclastos de caída como de las coladas piroclásticas, de las muestras representadas en las figuras anteriores (Fig. 6.23 y Fig. 6.27); y como puede verse existe una diferencia entre el comportamiento de ambos grupos; aunque en ambos casos a mayor densidad mayor resistencia, en el caso de las coladas este crecimiento es cada vez mayor diferenciándose claramente de los piroclastos de caída a partir de una densidad algo inferior a 13 kN/m³. Además, en la Fig. 6.29 se indican las líneas de tendencia que presentan con sus respectivos coeficientes de correlación, para cada material que, como puede observarse, son bastantes elevados.

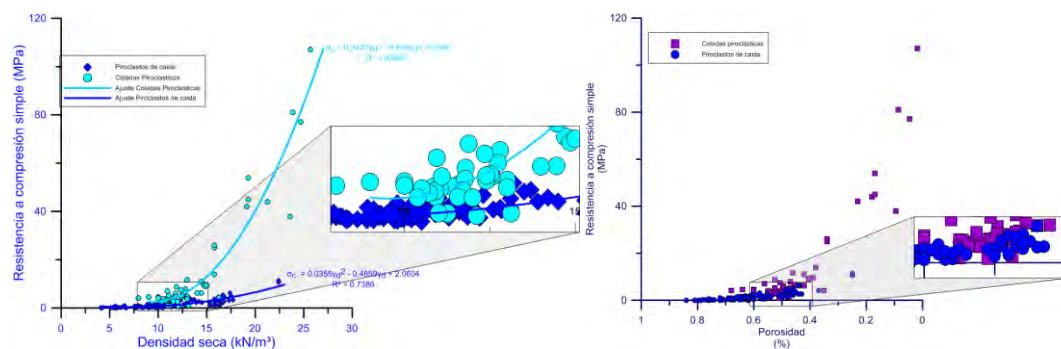


Fig. 6.29: Izqda.: Ajuste de la resistencia de compresión simple con la densidad seca para los piroclastos de caída y las coladas piroclásticas. El ajuste para las coladas piroclásticas se realizó teniendo en cuenta que la densidad mínima que se ha encontrado en estos materiales es de 8 kN/m³ y para el caso de los piroclastos de caída, la densidad mínima es de 4,1 kN/m³. Dcha.: Relación entre la compresión simple y la porosidad.

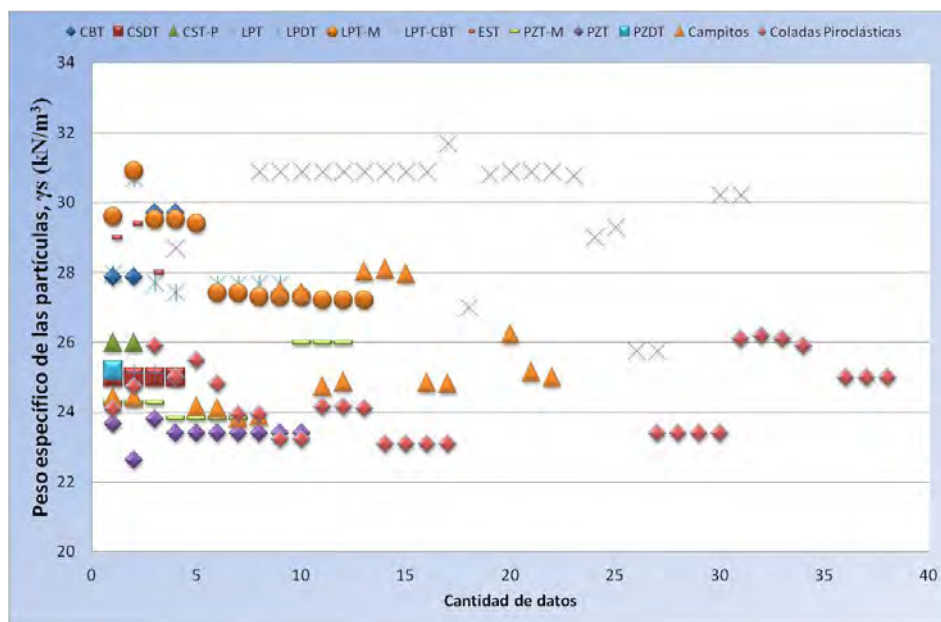


Fig. 6.30: Peso específico de las partículas (γ_s) de los diferentes piroclastos estudiados en esta investigación.

En la Fig. 6.29 puede parecer que a densidades comprendidas entre los 10 y 13 kN/m³ la resistencia a compresión simple de los piroclastos de caída y de las coladas piroclásticas tiene valores parecidos, aun siendo materiales con una génesis distinta. Si esta figura se representa en 3D, con la porosidad en el eje de las Z, se observa como dichos valores de compresión simple se diferencian con la porosidad; las tendencias de las curvas es a separarse con la disminución de la porosidad (Fig. 6.31). Esto es debido a que en esa zona las coladas, al tener un peso específico de las partículas (Fig. 6.30) (γ_s) menor que los piroclastos de caída, presentan porosidades menores (a igualdad de densidad), la cual se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \gamma_s(1 - n)$$

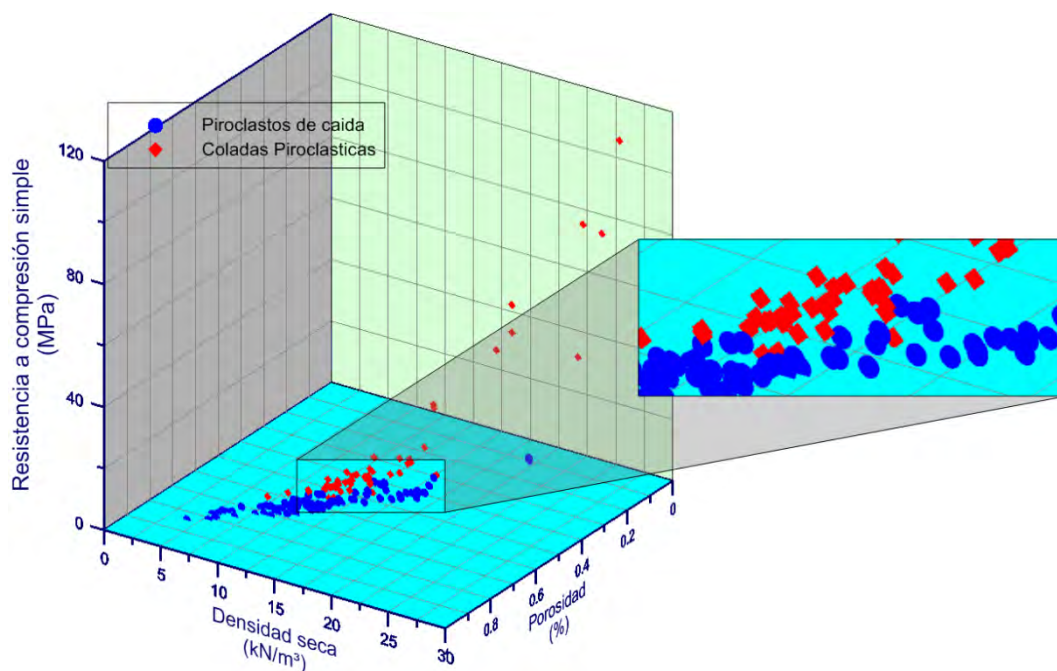


Fig. 6.31: Relación entre la resistencia a compresión simple, densidad y porosidad de los piroclastos de caída y de las coladas piroclásticas.

Se considera que estas correlaciones tienen una gran utilidad práctica, pues permiten acotar los valores de la resistencia a compresión simple de estos tipos de materiales en función de un parámetro sencillo de determinar, como es la densidad seca.

6.3.1.2 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión simple

Los valores de los módulos de elasticidad se han obtenido de las curvas de compresión simple, con la medida de la deformación vertical dada por el pistón.

El módulo de Young puede obtenerse de diferentes formas, entre otras, las siguientes:

- Pendiente de la porción recta de la curva, E_{lineal} .

- Pendiente de la curva en un punto determinado de la misma (generalmente al 50% de la resistencia de pico), E_t .
- Pendiente de la línea recta que une el origen de la curva con la resistencia de pico, E_{sec} .

La Fig. 6.32 muestra los valores del módulo de Young, E_{lineal} , tanto de las muestras ensayadas en esta investigación como de muestras ensayadas anteriormente (CEDEX, 2007; Serrano et al., 2007)). Se representa la relación obtenida entre el módulo de Young y la resistencia a compresión simple, o módulo relativo, con un coeficiente de correlación de 0.85. En el estudio llevado a cabo en el CEDEX en el año 2007 se llegó a una relación de $E/\sigma_c=180$, la cual es un poco mayor que la obtenida en este estudio, incluyendo los nuevos ensayos, que es:

$$\frac{E}{\sigma_c} \approx 160$$

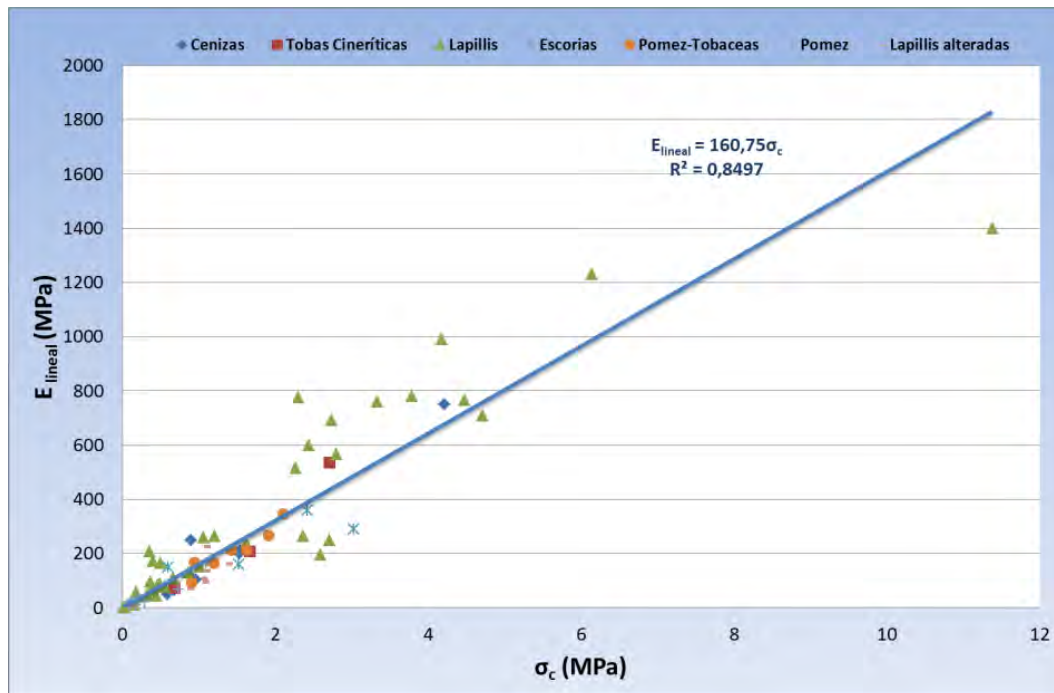


Fig. 6.32: Relación entre la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad obtenida de un total de 87 muestras de piroclastos, procedentes de varias partes de las Islas Canarias.

6.3.2 Curvas de correlación obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión isotropa

6.3.2.1 Resistencia a compresión isotropa en función de la densidad seca y de la porosidad

En la Fig. 6.33 se muestran los resultados de los ensayos de compresión isotropa en

los piroclastos de caída, con la presión isotrópica de colapso (p_{ci}) en función de la densidad seca (γ_d) para cada grupo de muestras estudiadas. Como puede observarse, al igual que con la resistencia a compresión simple, existe una clara relación creciente entre dicha presión de colapso y la densidad seca de los materiales.

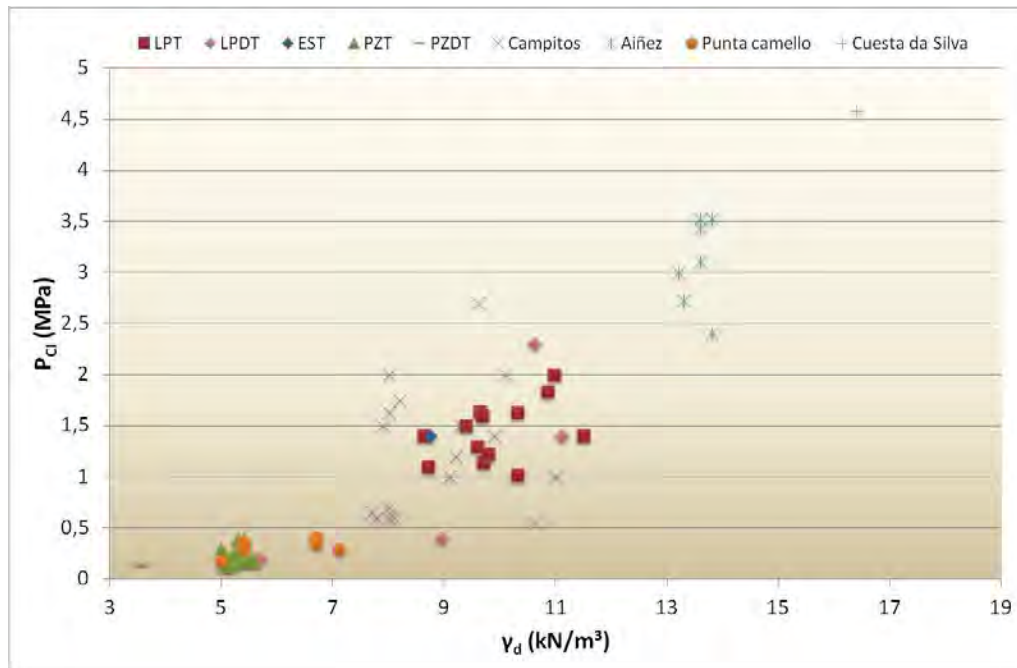


Fig. 6.33: Relación entre la presión de colapso (p_{ci}) y la densidad seca (γ_d). Esta gráfica incluye tanto las nuevas muestras como los trabajos anteriores del año 2007 y 1976; un total de 65 ensayos de compresión isotrópica.

Asimismo, también existe una relación análoga con la porosidad, tal y como se muestra en la Fig. 6.34. En la Fig. 6.35 se muestra en un gráfico tridimensional la variación de la presión isotrópica tanto con la densidad seca como con la porosidad.

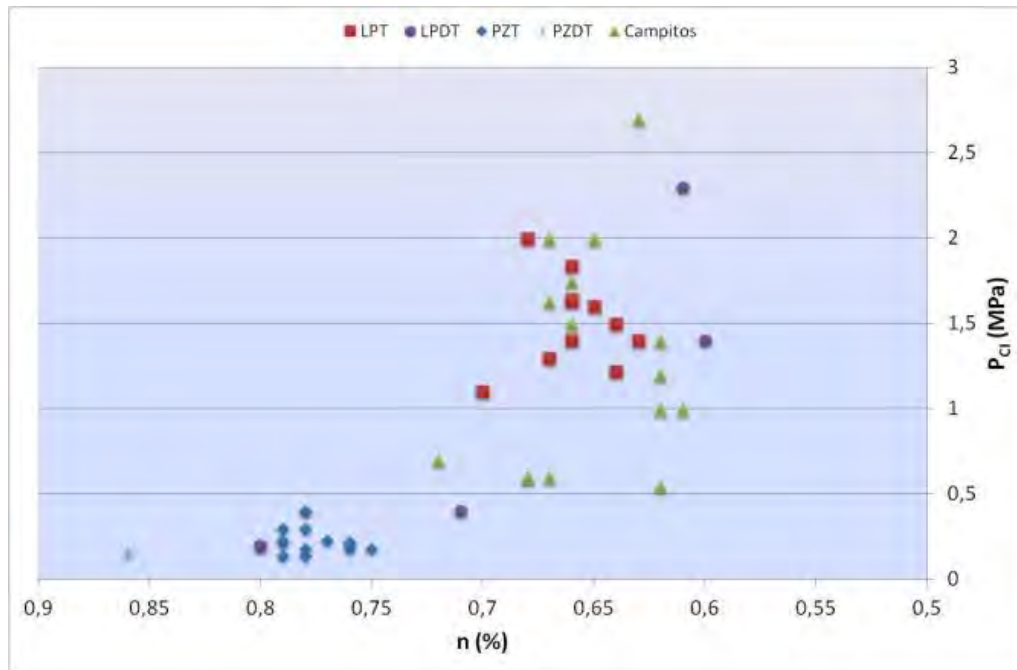


Fig. 6.34: Izq.: Relación entre la presión de colapso (p_{ci}) y la porosidad (n).

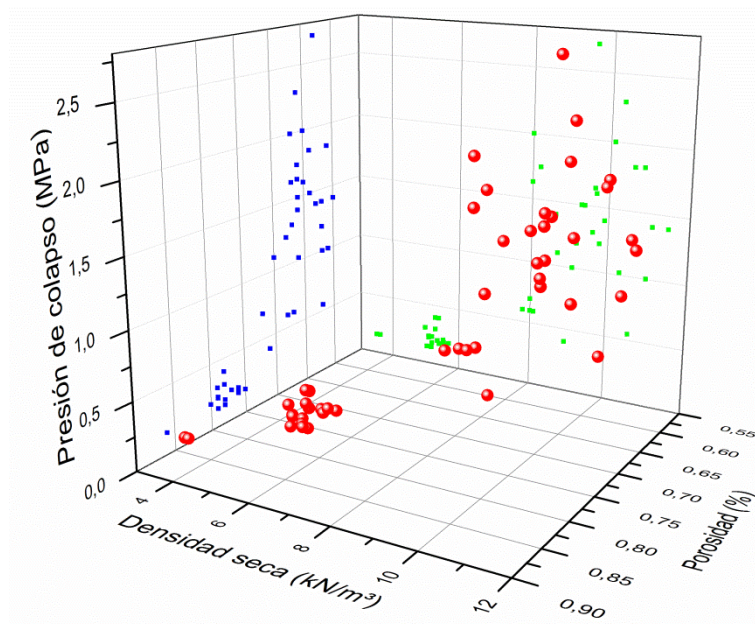


Fig. 6.35: Gráfica en 3D mostrando la relación entre la presión de colapso, la densidad y la porosidad.

Por otra parte, en la Fig. 6.36 se han recopilado conjuntamente los resultados tanto de los piroclastos de caída como de las coladas piroclásticas de las muestras representadas en las figuras anteriores. Se observa, al igual que con la resistencia a compresión simple, que existe una diferencia entre el comportamiento de las coladas piroclásticas y los piroclastos de caída, puesto que en el caso de las coladas este

crecimiento es mayor. En el gráfico se presentan las líneas de tendencia con sus respectivos coeficientes de correlación para cada material que, como puede observarse, son muy elevados. Por su parte, en la Fig. 6.37 se han representado los mismos valores en función de la porosidad. A pesar de que puede parecer que la curva correspondiente a las coladas podría ser continuación de la de los piroclastos de caída, esto no es así, ya que de ser cierto ello debería haberse manifestado también en la relación de la presión de colapso con la densidad seca. Simplemente, no hay datos de las porosidades de aquellos piroclastos de caída que tienen mayor densidad y mayor resistencia a compresión simple (línea discontinua).

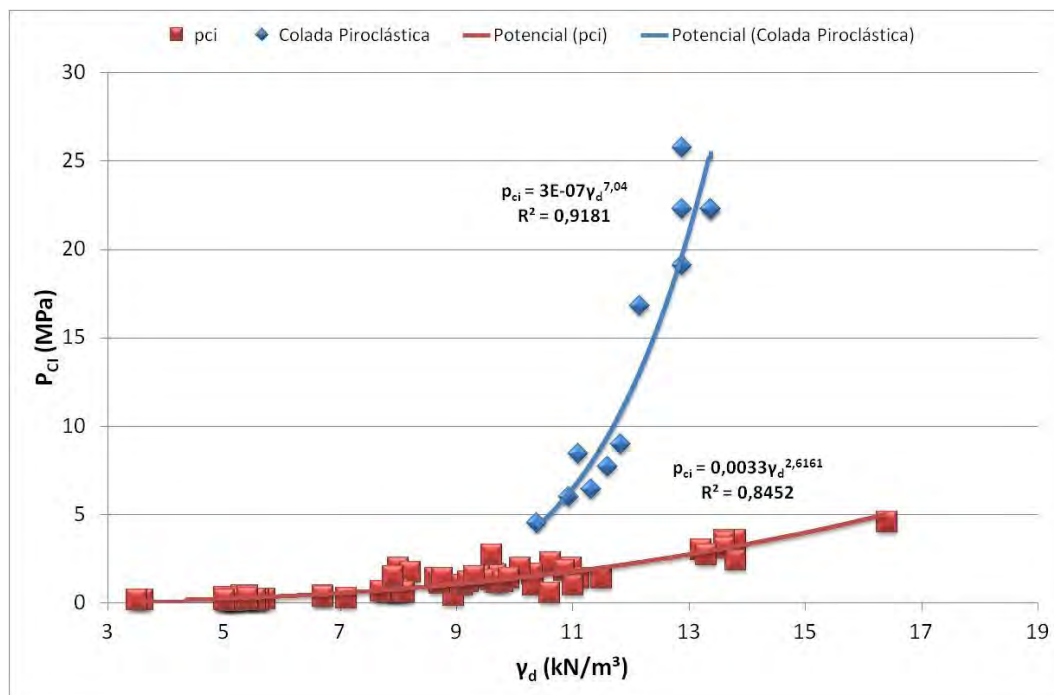


Fig. 6.36: Ajuste entre la presión de colapso (p_{ci}) la densidad seca (γ_d) tanto en coladas piroclásticas como en piroclastos de caída.

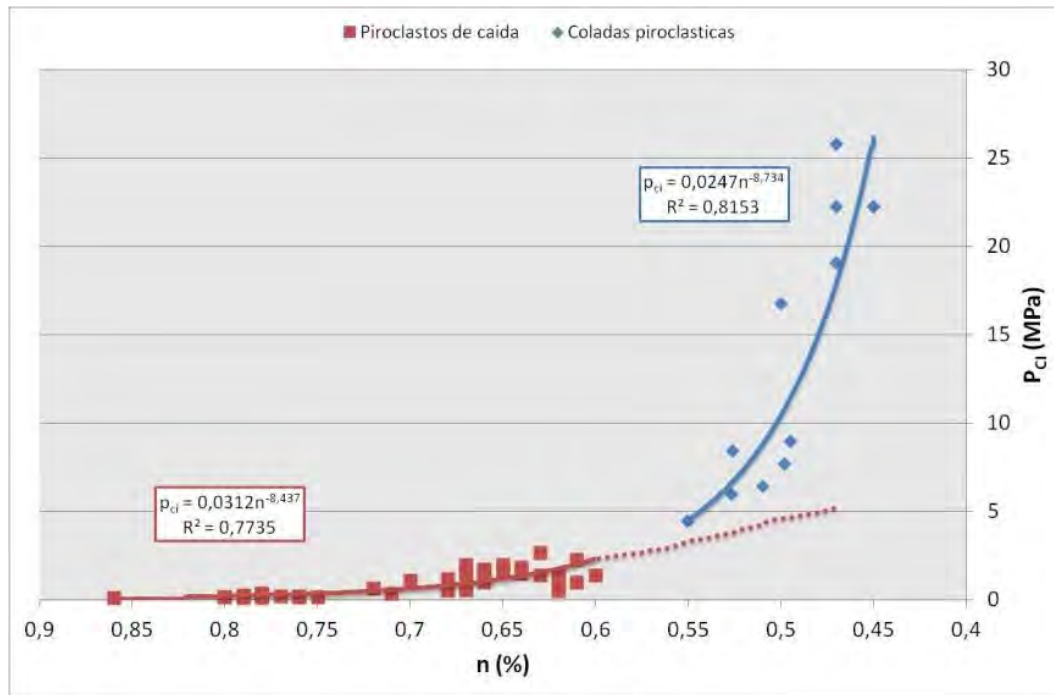


Fig. 6.37: Ajuste entre la presión de colapso (p_{ci}) y la porosidad (n), tanto coladas piroclásticas como en piroclastos de caída.

Dentro de los trabajos correspondientes a esta investigación, como se indica en el Capítulo 4, se llegó de forma teórica a una relación entre la presión de colapso y la densidad, y tiene la siguiente forma (Serrano et al., 2010):

$$p_{ci} = L\gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^\alpha$$

En la Fig. 6.38 se observa el mejor ajuste para las muestras ensayadas anteriormente (curva verde) (Serrano et al., 2010), que incluye un total de 33 muestras. Además se presentan, por un lado, el ajuste obtenido incluyendo las nuevas muestras (31) (curva azul) y por otro, el ajuste realizado con Excel mediante el error cuadrático mínimo (curva roja). Como puede verse, tanto esta curva como la ajustada mediante la fórmula anterior a las muestras ensayadas en este trabajo son muy parecidas, diferenciándose sólo a altas densidades (a partir de los 16 kN/m³). El intervalo más importante es aquel que está comprendido entre los 5 y los 12 kN/m³, ya que son los que presentan una presión de colapso baja y por tanto peligrosa desde el punto de vista ingenieril, y para este intervalo ambas curvas prácticamente coinciden y presentan un coeficiente de correlación muy elevado. Se verifica, por tanto, un buen ajuste entre la relación obtenida de forma teórica y los resultados empíricos de este estudio, deduciéndose unos parámetros de:

- $\alpha=1$
- $L=276 \text{ m}$

$$- G=30 \text{ kN/m}^3$$

Aunque el valor de G parece un elevado, como puede verse en la Fig. 6.30 para el caso de las lapillis el valor de G (peso específico de las partículas) está por encima de los 30 kN/m^3 y teniendo en cuenta que las lapillis son el grupo que presentan más datos ensayos, entendible que el valor de G este en el mismo orden que el de las lapillis.

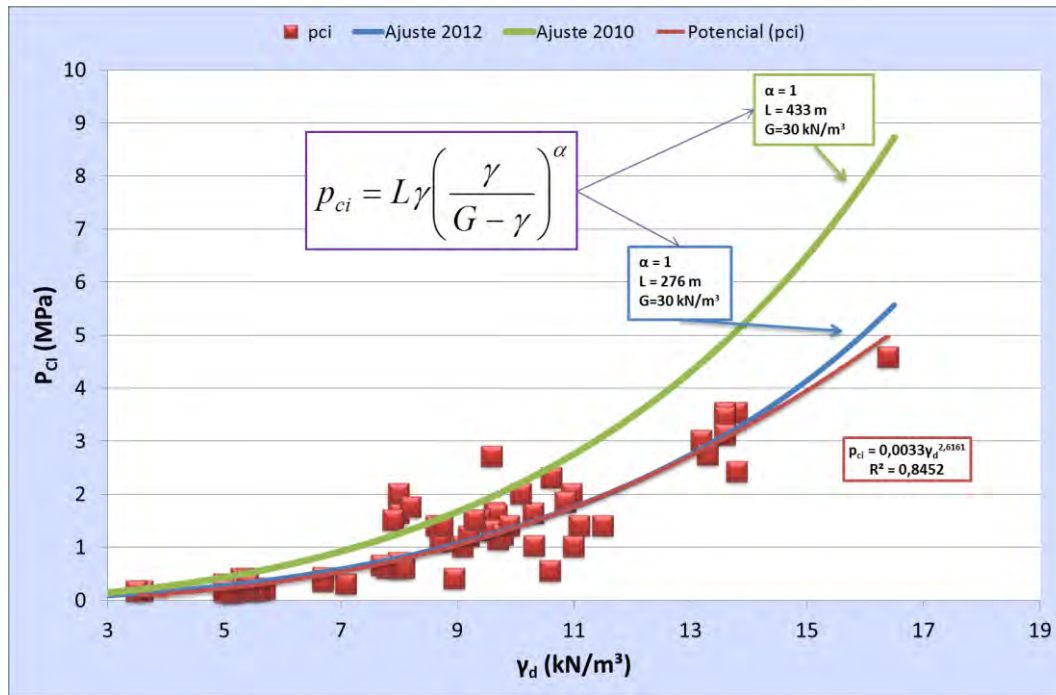


Fig. 6.38: Relación entre la presión de colapso (p_{ci}) y la densidad seca (γ_d). Se muestran tanto el ajuste obtenido con los datos del 2007 como el nuevo ajuste que incluyen las nuevas muestras, en total 65 muestras. En rojo aparece el ajuste obtenido en Excel con su coeficiente de correlación.

6.3.2.2 Módulos de elasticidad antes y después del colapso. Relación con la densidad seca

En la Fig. 6.39 se han representado conjuntamente los valores de los módulos de elasticidad deducidos como parte lineal de las curvas de tensión-deformación en los ensayos de compresión isótropa, antes y después de producirse el colapso de la roca. Como puede verse, la relación entre ambos módulos es aproximadamente lineal, con un coeficiente de correlación bastante elevado, y puede decirse que el valor del módulo se reduce aproximadamente a 1/5 del valor inicial, una vez que se produce el colapso de la estructura del material. Este valor parece ser mayor para valores mayores de la densidad seca del material, como podría deducirse de las Fig. 6.40 y Fig. 6.41.

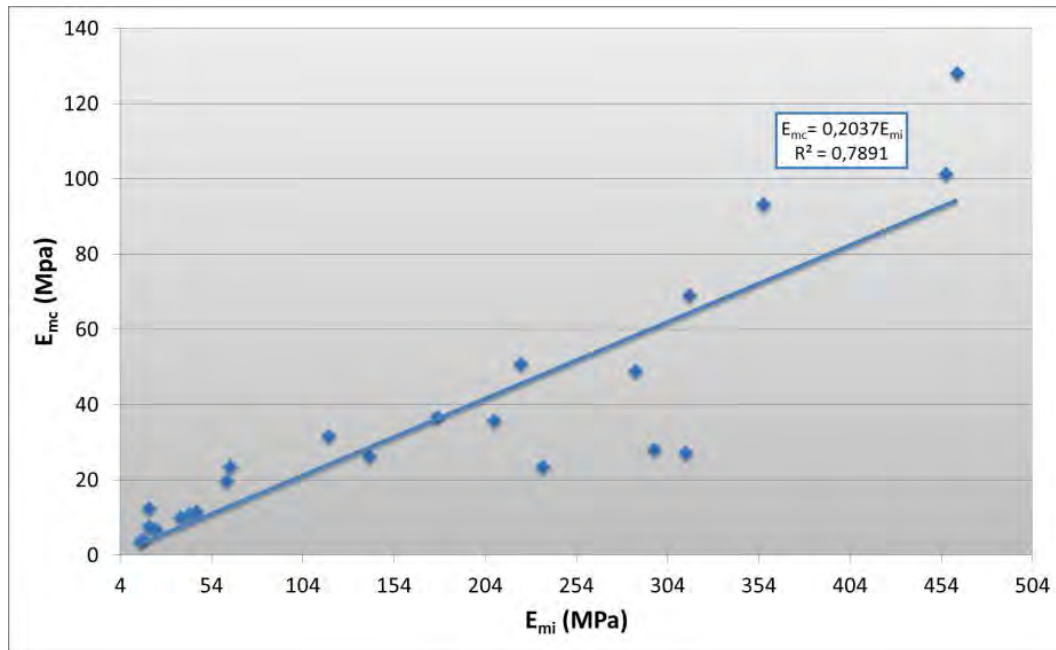


Fig. 6.39: Relación entre el módulo de elasticidad antes del colapso de la estructura (E_{mi}) y después del colapso (E_{mc}).

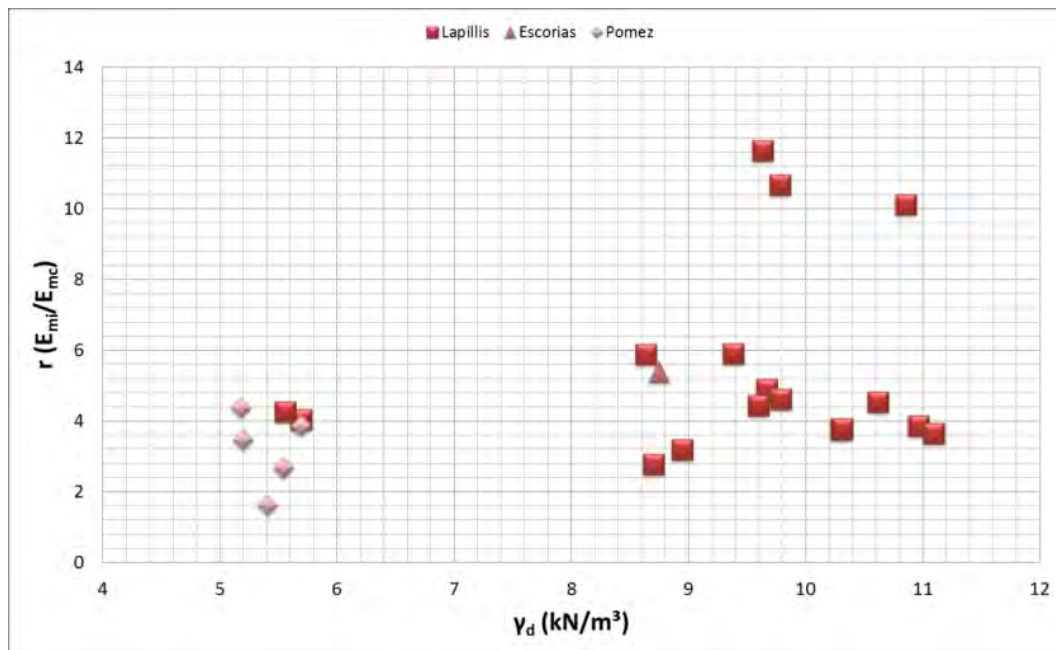


Fig. 6.40: Relación entre r , que es la relación entre el módulo de elasticidad antes y después del colapso bajo condiciones isotropas (E_{mi}/E_{mc}), y la densidad seca (γ_d).

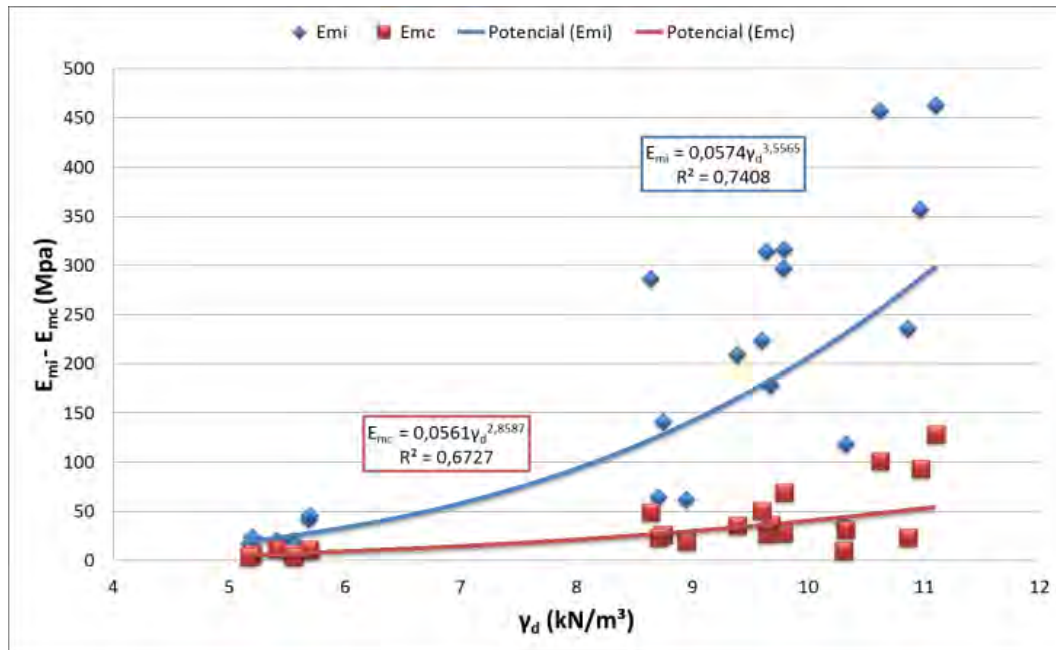


Fig. 6.41: Relación entre el módulo de elasticidad antes (E_{mi}) y después (E_{mc}) del colapso con la densidad seca (γ_d).

6.3.2.3 Módulos de compresibilidad. Relación con la densidad seca

En la Fig. 6.42 se representa la variación del módulo de compresibilidad ($k = \Delta P / \Delta Vol$), obtenida como cociente entre la presión isotropa aplicada y la deformación volumétrica estimada, con la densidad seca, antes del colapso. Como se observa en la figura, es una relación creciente, que presenta bastante dispersión, la cual en parte puede ser debida a que la precisión de medida no ha sido elevada.

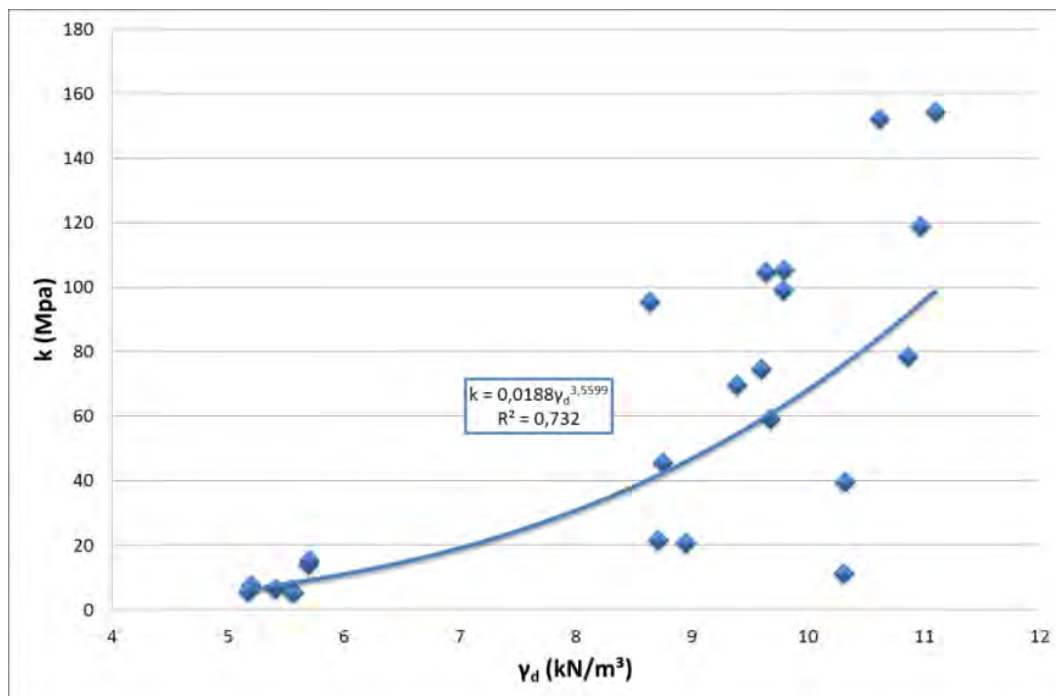


Fig. 6.42: Relación entre el módulo de compresibilidad (k), antes del colapso, con la densidad seca (γ_d).

6.3.2.4 Relación entre la presión isotrópica de colapso y la resistencia a compresión simple

En la Fig. 6.43 se representan conjuntamente los valores de la presión isotrópica de colapso y la resistencia a compresión simple tanto de las muestras ensayadas en este trabajo (símbolos con relieve), como de las de trabajos anteriores del CEDEX. Se observa una correlación lineal entre ambos valores, como ya se había deducido en otros estudios presentados en el Capítulo 4 (CEDEX, 2007; Serrano et al., 2007), si bien el valor de la correlación varía ligeramente frente al obtenido anteriormente. En los citados estudios anteriores, basados en un número menor de muestras, igual a 10, se obtuvo un valor:

$$p_{ci} = 2,5 * \sigma_c$$

con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,8$.

En el estudio actual, basado en las mismas muestras anteriores y en 54 muestras más, la nueva correlación que se obtiene es:

$$p_{ci} = 2,28 * \sigma_c$$

con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,78$.

Para este ajuste no se tuvieron en cuenta las muestras alteradas M-7072, M-7068 y M-7074 (Fig. 6.43) ya que estas muestras están alteradas y por tanto su valor de compresión simple es menor del que deberían de tener sin alteración.

Por otra parte, la ley parabólica de resistencia sugiere que la razón p_{ci}/σ_c es una función de M y δ . El valor 2.28 representa el valor medio de esa función correspondiente a las muestras ensayadas.

Que exista una relación entre la compresión simple (ensayo en el que la soldadura de las partículas juega el papel más importante en la resistencia, como se indicó en el Capítulo 5) y la presión de colapso (ensayo en el que la resistencia de las partículas influye mucho más que la soldadura de las partículas) parece lógico ya que a mayor soldadura mayor resistencia de las partículas. Esto es debido a que el grado de soldadura aumenta cuanto más calientes caen las partículas, lo que tiene lugar a distancias próximas del foco emisor, y las partículas que caen a esas distancias son las que presentan un mayor peso, lo que se traduce en menor porosidad y en partículas más resistentes.

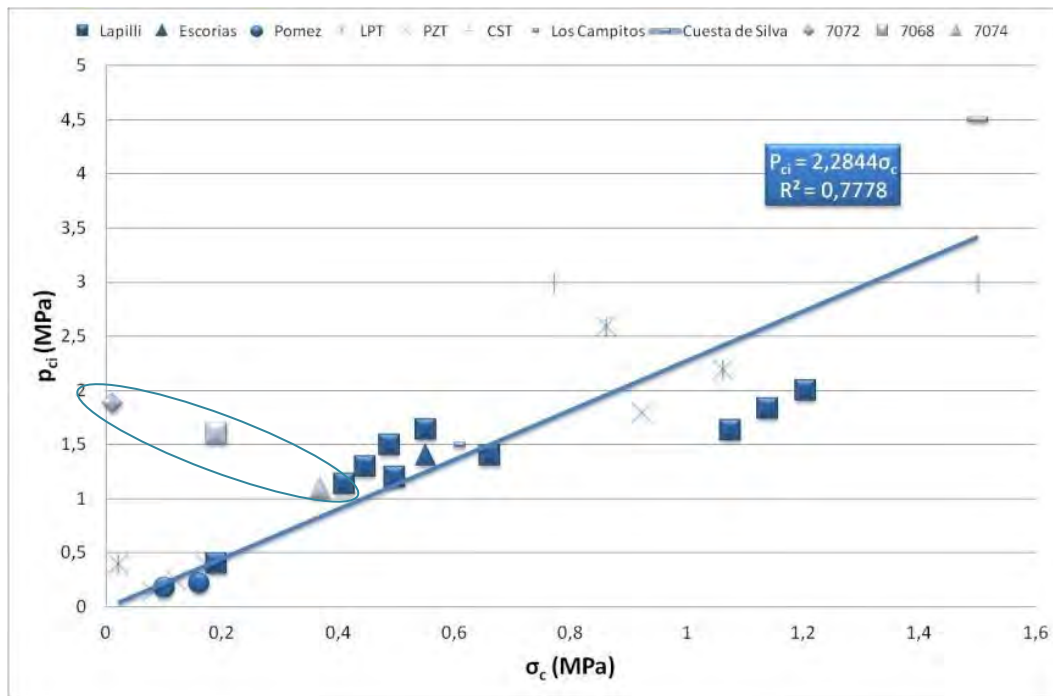


Fig. 6.43: Relación entre la presión de colapso (p_{ci}) de los distintos tipos de piroclastos de caída estudiados y la resistencia a compresión simple (σ_c). Señaladas aparecen las muestras ligeramente alteradas.

En la Fig. 6.44 se muestran la relación entre la presión de colapso y la resistencia a compresión simple de todas las muestras y además su relación con la densidad.

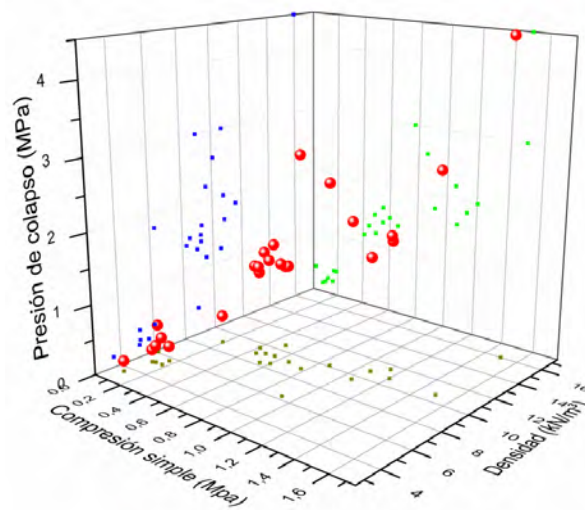


Fig. 6.44: Relación entre la presión de colapso, la resistencia a compresión simple y la densidad de las muestras ensayadas en esta investigación, así como también las ensayadas en estudios anteriores (CEDEX, 2007).

A continuación se presentan, en la Fig. 6.45, las diferentes relaciones obtenidas para diversos tipos de piroclastos. Para el caso de las Coladas Piroclásticas, las relaciones se sacaron de la bibliografía recogida en el Capítulo 3. Como se observa en dicha figura, tanto los Piroclastos de Caída como las Coladas Piroclásticas presentan una relación entre la presión de colapso y la resistencia a compresión simple que varía desde 2.28 hasta 1.5.

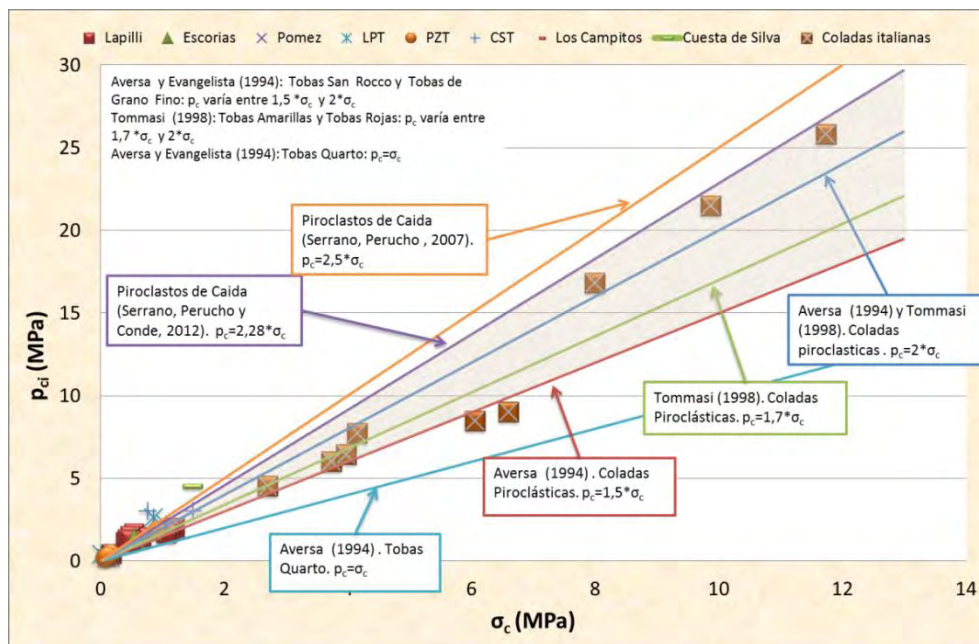


Fig. 6.45: Diferentes relaciones entre la presión de colapso, p_c , y la resistencia a compresión simple, σ_c , en distintos piroclastos. La parte sombreada es la zona con mayor ocurrencia en los datos de ensayos tanto recopilados como realizados durante esta investigación.

6.4 APÉNDICE 1: AJUSTE EMPÍRICO EN MUESTRAS REALES. CASO ELÍPTICO COLAPSABLE

Desde la Fig. 6.46 hasta la Fig.6.51 se muestran los diferentes ajustes tipo Elíptico Colapsable llevados a cabo en las muestras reales. Como puede verse en la mayoría de los casos, el ajuste a los valores de ensayos para cada muestra es muy bueno. No obstante, hubo algunas muestras que no se pudieron ajustar con éste método.

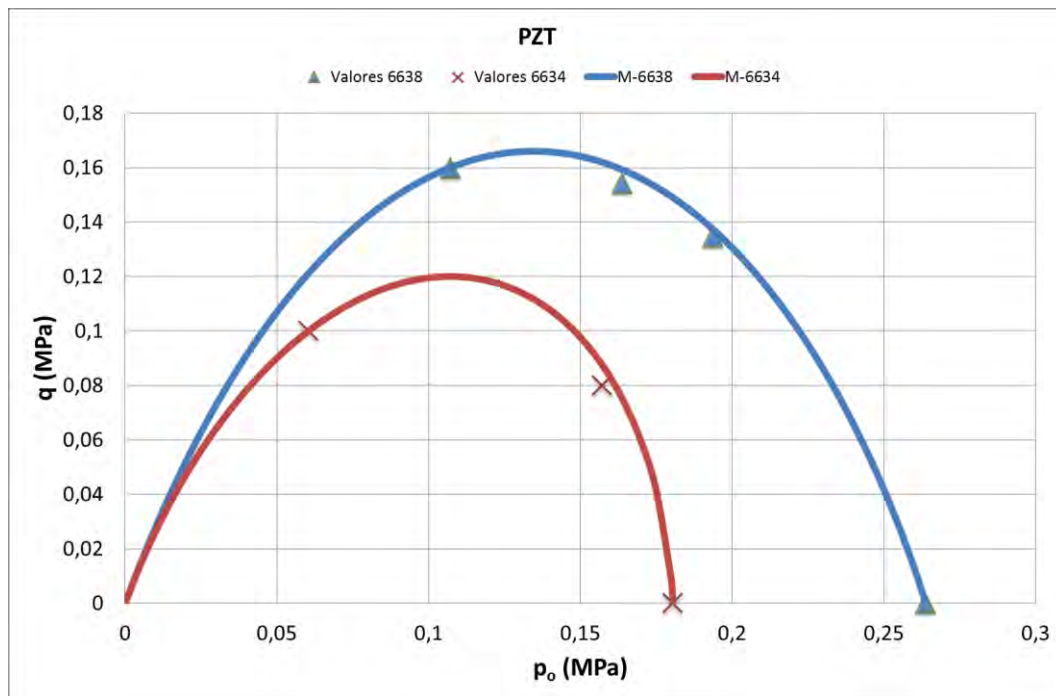


Fig. 6.46: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las pómez soldadas.

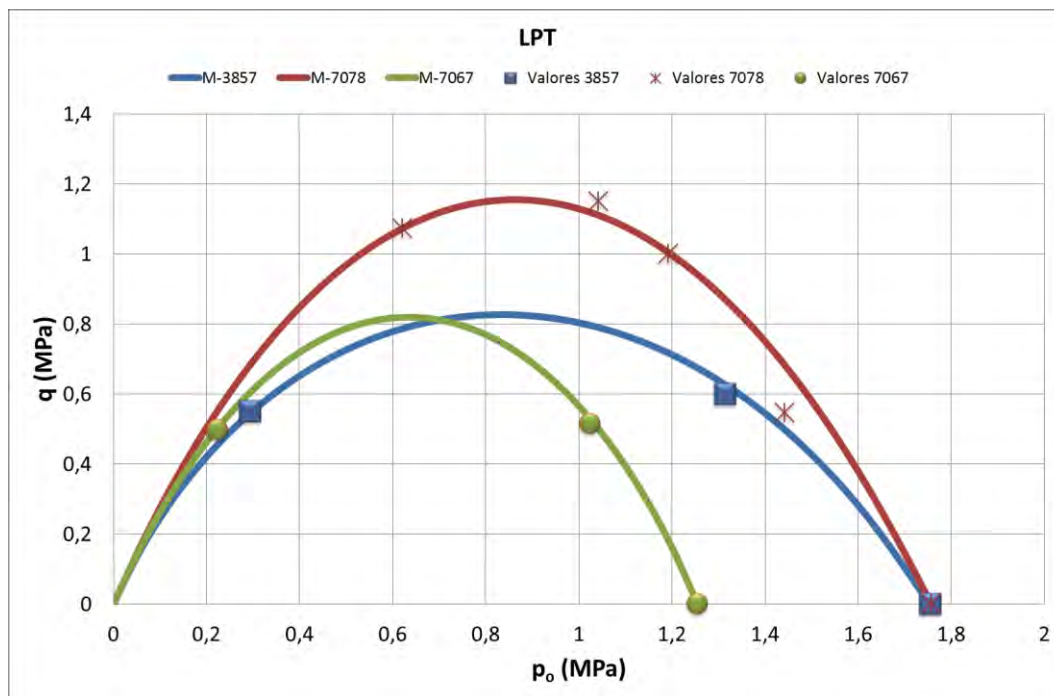


Fig. 6.47: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las lapillis soldadas.

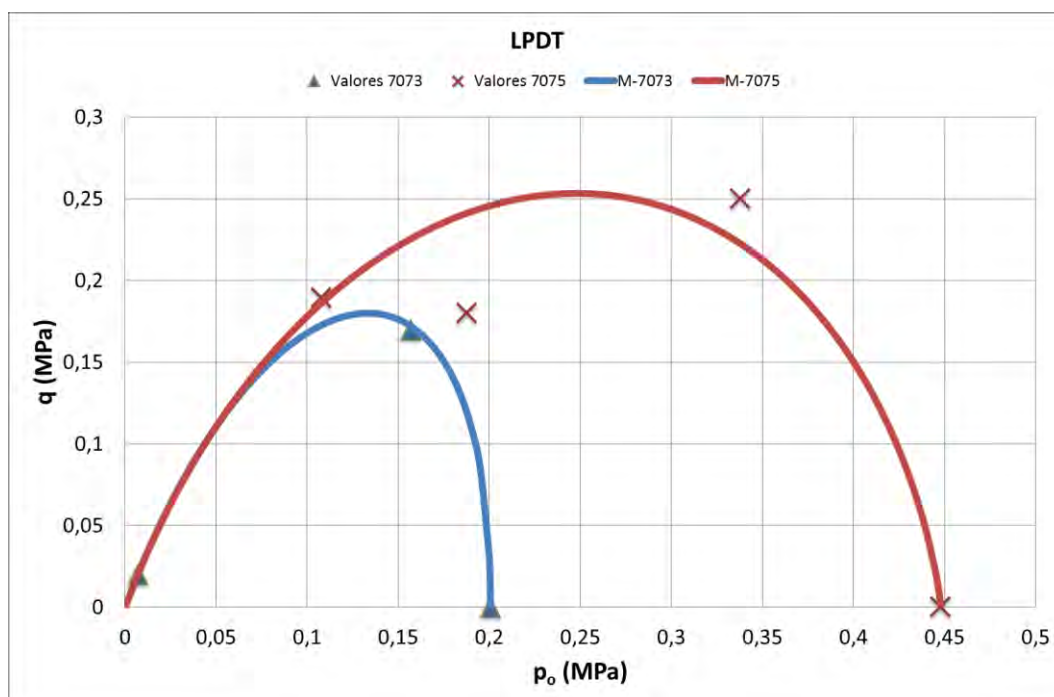


Fig. 6.48: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las lapillis débilmente soldadas.

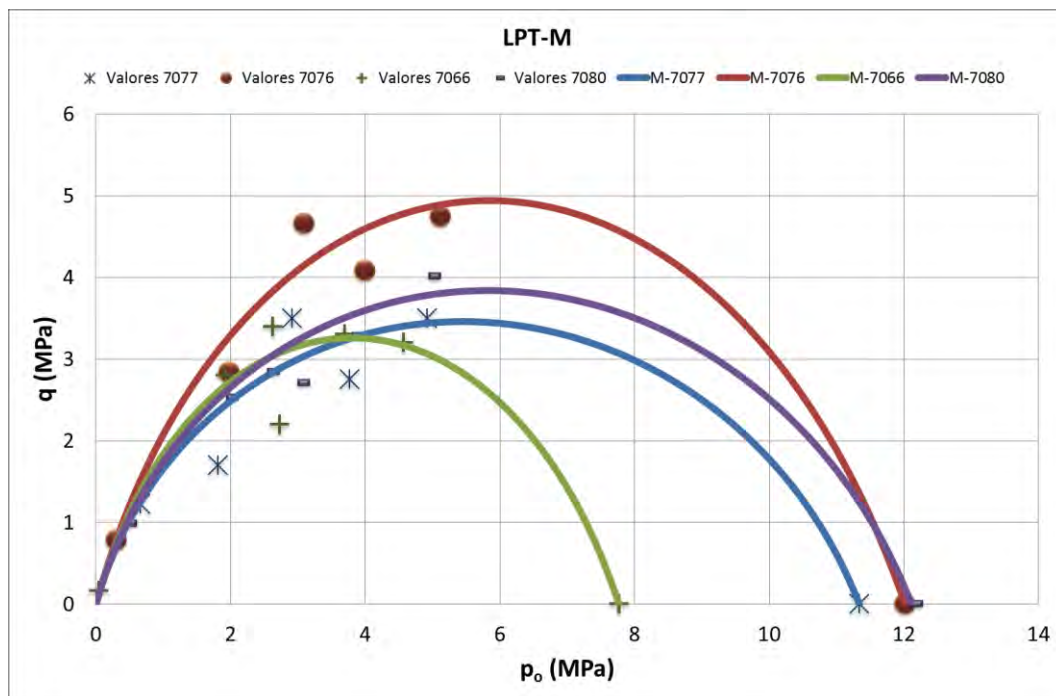


Fig. 6.49: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las lapillis alteradas con matriz.

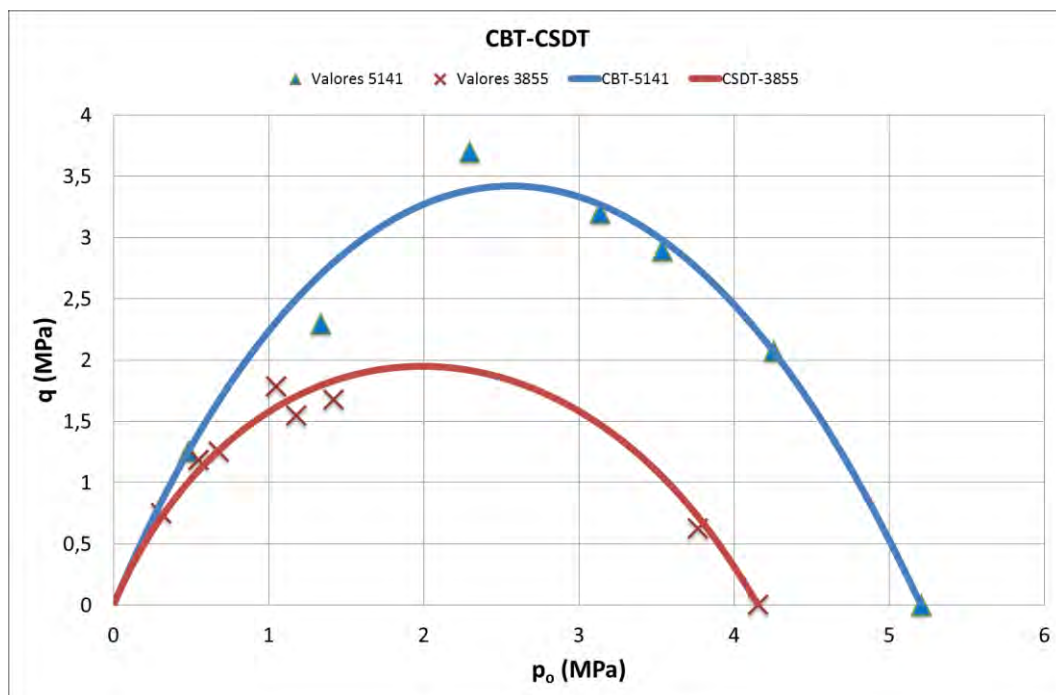


Fig. 6.50: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las cenizas basálticas (CBT) y las cenizas sálicas débilmente soldadas (CSDT).

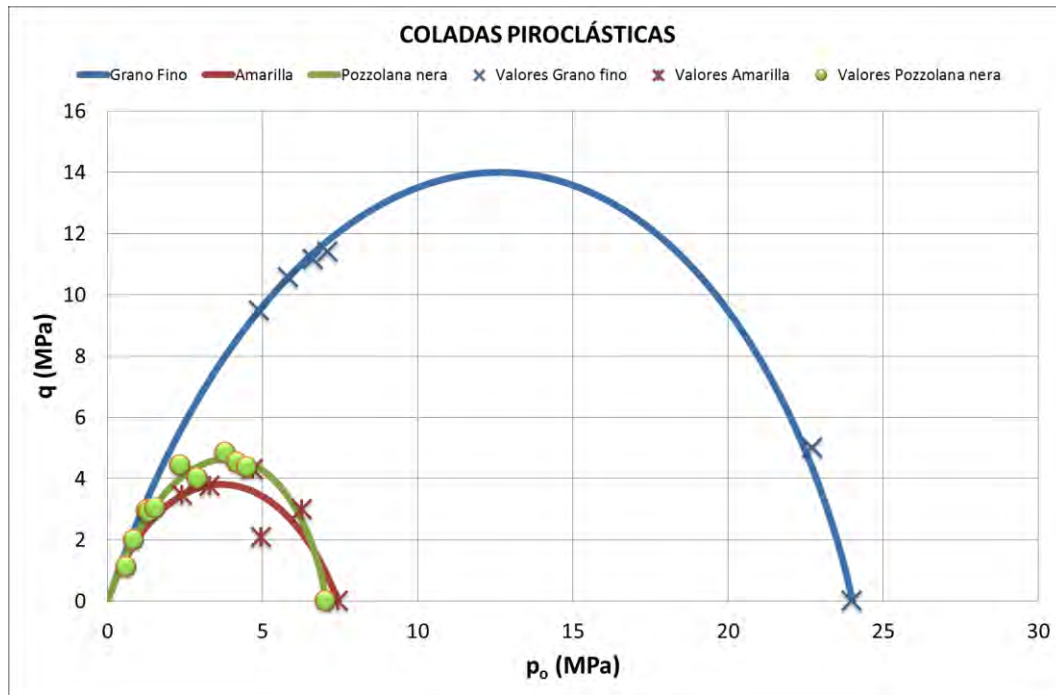


Fig.6.51: Curvas de colapso, tipo Elíptico Colapsable, para las coladas piroclásticas.

En la Tabla 6.6 se resumen los valores de los diferentes parámetros obtenidos en el ajuste tipo Elíptico Colapsable.

Tabla 6.6: Valores de los parámetros para el ajuste del tipo Elíptico Colapsable.

$q^2 + 2\beta q = 6\beta(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c + t}\right)^\lambda$						
Tipo	Muestras	β (MPa)	λ	t (MPa)	P_{co} (MPa)	$\delta = t/p_{co}$ (%)
LPT	3857	0.85	1.10	0.11	1.75	6.51
	7078	5.17	1.04	0.26	1.76	14.94
	7067	2.47	0.98	0.05	1.25	4.34
LPDT	7073	0.32	0.50	0.0003	0.20	0.17
	7075	0.24	0.81	0.05	0.45	10.68
PZT	6634	0.13	0.68	0.03	0.18	15.02
	6638	0.37	0.96	0.05	0.26	20.36
LPT-M	7077	1.30	1.08	0.25	11.34	2.21

$q^2 + 2\beta q = 6\beta(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_c + t}\right)^\lambda$						
Tipo	Muestras	β (MPa)	λ	t (MPa)	P _{co} (MPa)	$\delta = t/p_{co}$ (%)
	7076	3.28	1.06	0.04	12.02	0.32
	7066	2.22	1.04	0.002	7.77	0.03
	7080	1.55	1.08	0.12	12.12	1.01
CBT	5141	14.50	1.03	0.06	5.21	1.24
CSDT	3855	1,93	1,09	0,06	4,16	1,42
COLADAS PIROCLASTICAS	Amarillas	4.44	1.03	1.26	7.43	16.91
	Puzolana Nera	7.79	0.82	0.17	7.03	2.38
	Grano Fino	18.47	0.90	1.71	23.99	7.14

Como se puede observar en la Fig. 6.52, los valores de λ obtenidos con el ajuste Elíptico Colapsable son muy similares a los obtenidos en el ajuste Parabólico Colapsable. En cuanto al valor de δ , mediante el ajuste Elíptico Colapsable se obtienen δ menores que en el Parabólico Colapsable.

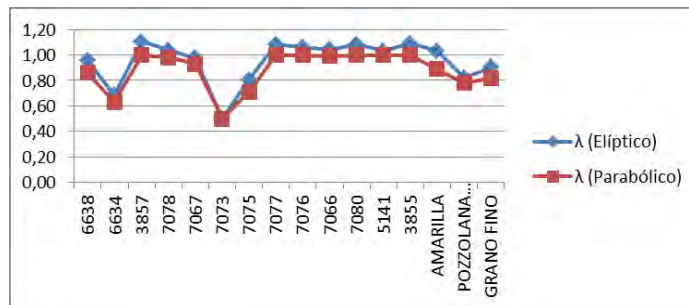


Fig. 6.52: Valores de λ obtenidos con los dos casos (Parabólico Colapsable y Elíptico Colapsable).

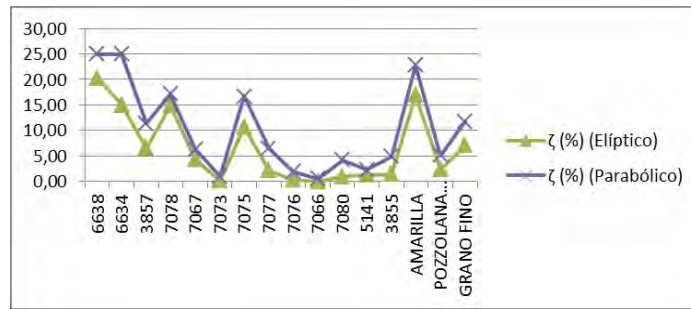


Fig. 6.53: Valores de δ obtenidos con los dos casos (Parabólico Colapsable y Elíptico Colapsable).

Para confirmar la relación obtenida en el año 2002 (Serrano et al, 2002a), se incorporaron los valores de β , que resultaron del ajuste realizado mediante el caso Elíptico Colapsable, en la gráfica 3.23 del Capítulo 3. Como puede verse en la Fig. 6.54, existe una relación exponencialmente creciente entre β y la densidad seca (γ_d) de estos materiales, tal y como se concluyó en el estudio anteriormente mencionado.

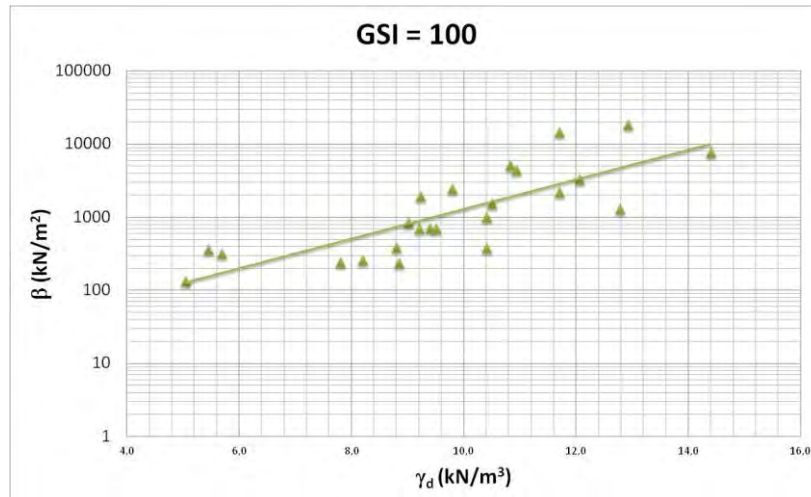


Fig. 6.54: Relación entre el parámetro β y la densidad seca (γ_d) en las muestras de piroclastos Canarios.

Para el caso de δ , sin embargo, no parece existir ninguna tendencia general y lo que se obtuvo, como se observa en la Fig. 6.55, fue una nube de puntos.

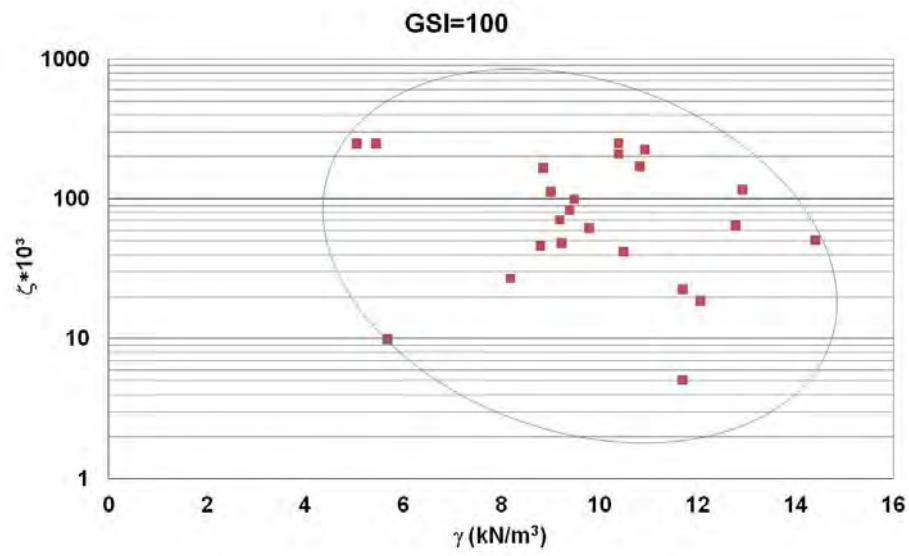


Fig. 6.55: Valores de δ en función de la densidad seca (γ_d) para las muestras de piroclastos Canarios.

6.5 APÉNDICE 2: AJUSTE TEÓRICO EN MUESTRAS REALES

6.5.1 Curvas de colapso no asociadas y aditivas

La curva de colapso no asociada y aditiva tiene la siguiente forma:

$$\frac{p_{co}}{p_0} = \frac{M_F^2 + \eta_0^2 - 2a\eta_0}{M_F^2} \text{Exp} \left[\frac{2a}{s} \arctan \left(\frac{\eta_0 s}{M^2 - a\eta_0} \right) \right]$$

Ecuación 1: Ecuación de la curva de colapso para dilatancia asociada en el caso aditivo.

Donde $a = \alpha_A$, $M_F^2 - a^2 = s^2$ y $\eta_0 = \frac{q}{p_{co}}$

Cuando $a = \alpha_A = 0$ se trata de curvas de colapso asociadas.

A continuación se muestran los diferentes ajustes obtenidos en diversas muestras de piroclastos (Fig. 6.56 - Fig. 6.63).

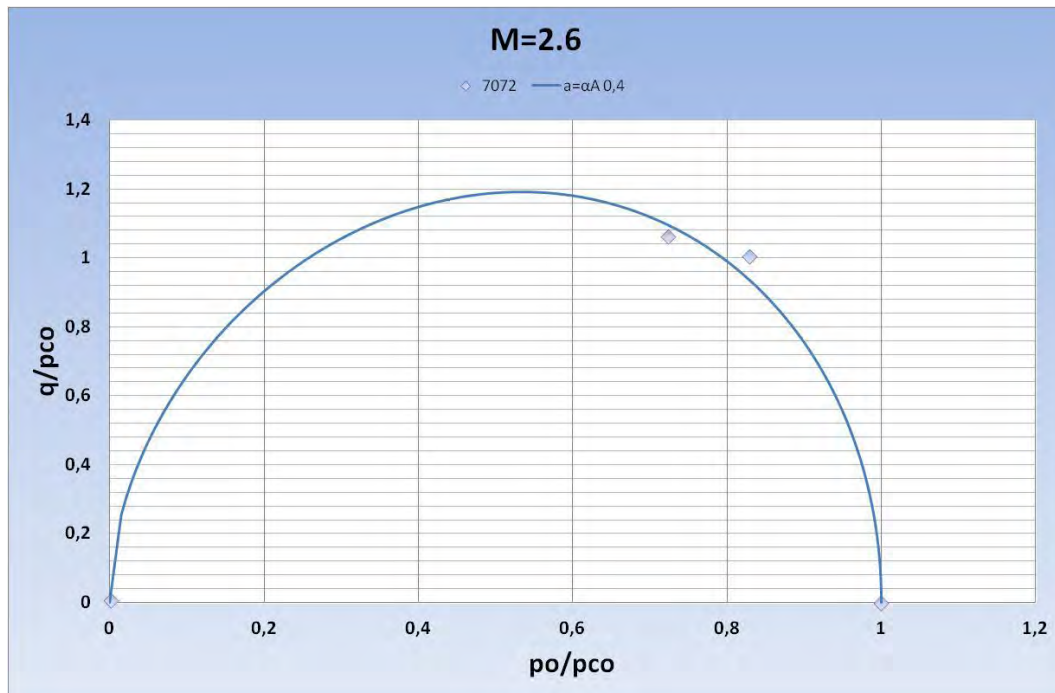


Fig. 6.56: Curvas de colapso no asociada y aditivas para las lapillis débilmente soldadas (LPDT). Muestra 7072.

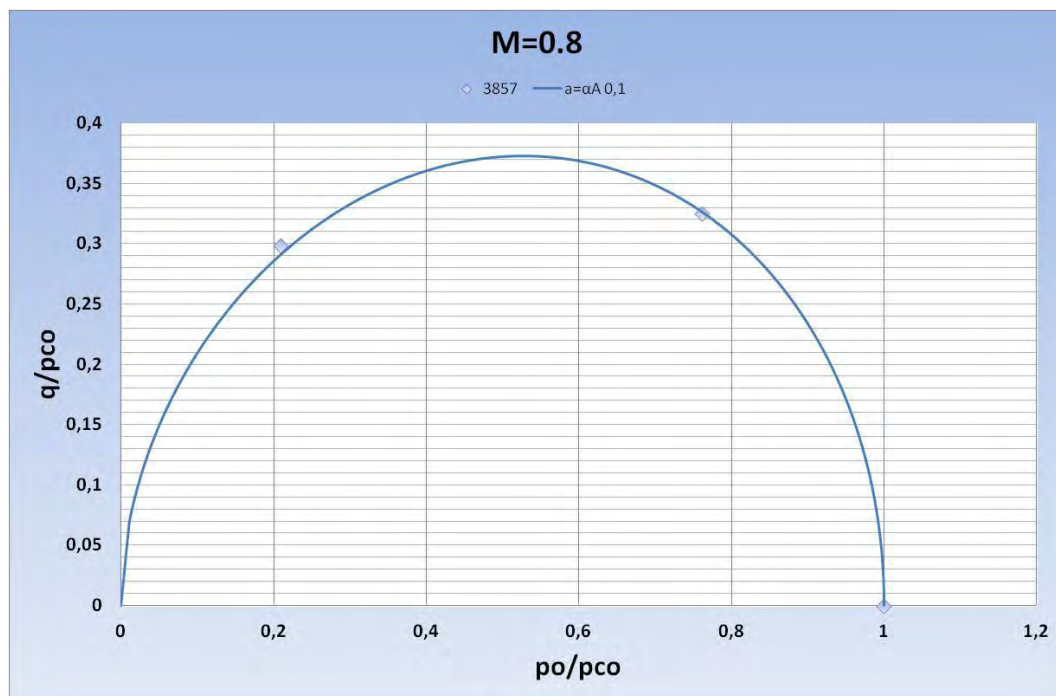


Fig. 6.57: Curvas de colapso no asociada y aditivas para las lapillis soldadas (LPT). Muestra 3857.

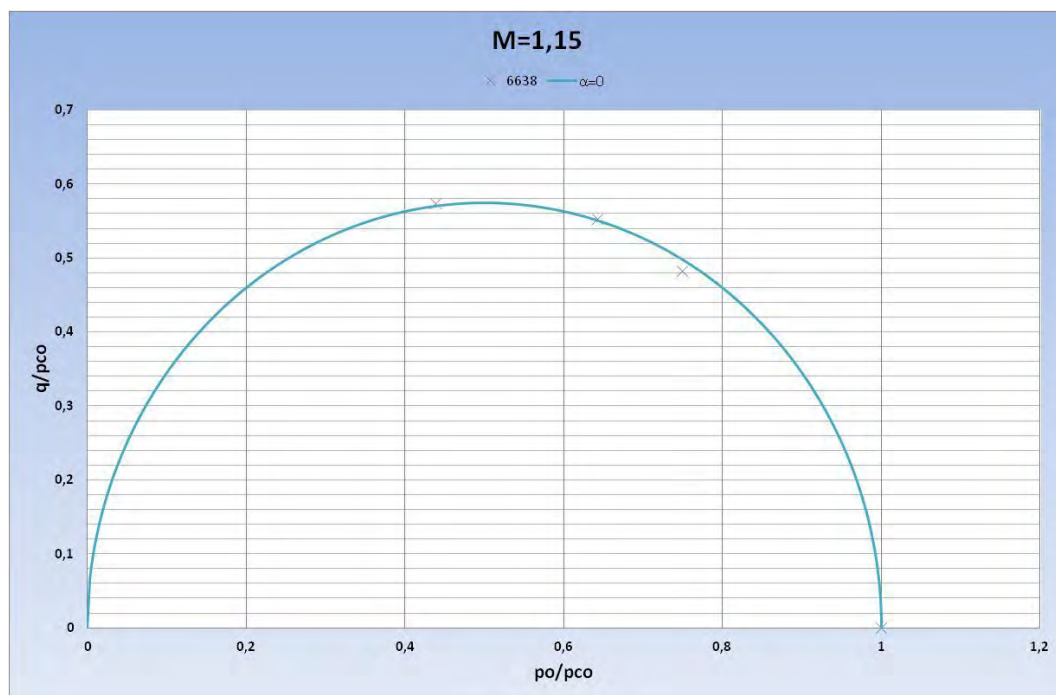


Fig. 6.58: Curvas de colapso asociada y aditivas para las pómez (PZT). Muestra 6638.

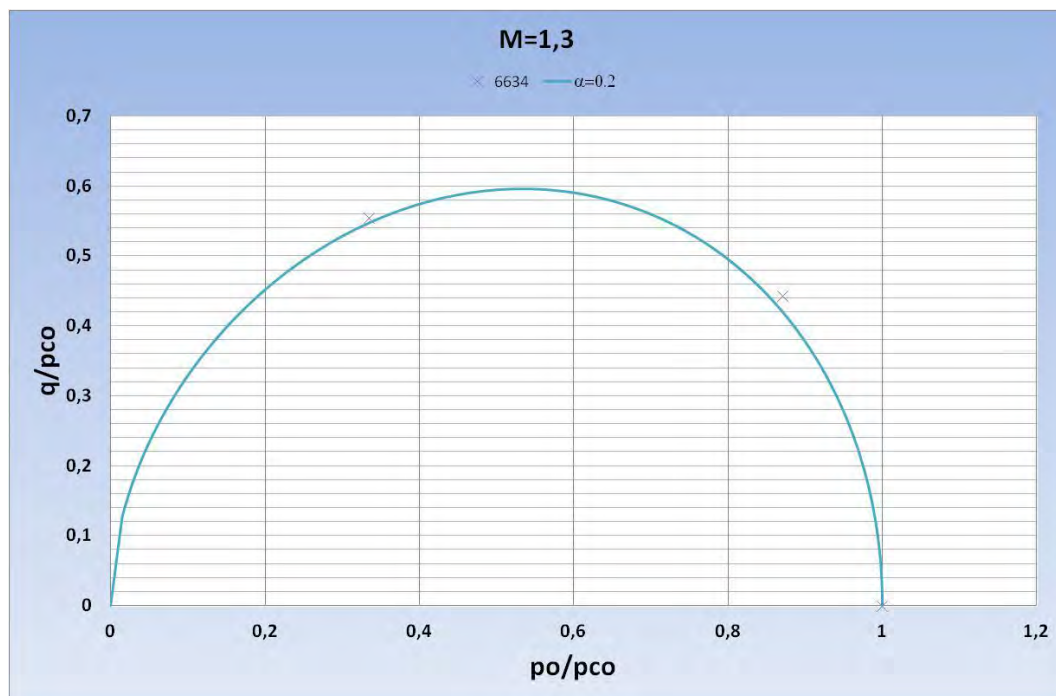


Fig. 6.59: Curvas de colapso no asociada y aditivas para las pómez (PZT). Muestra 6634.

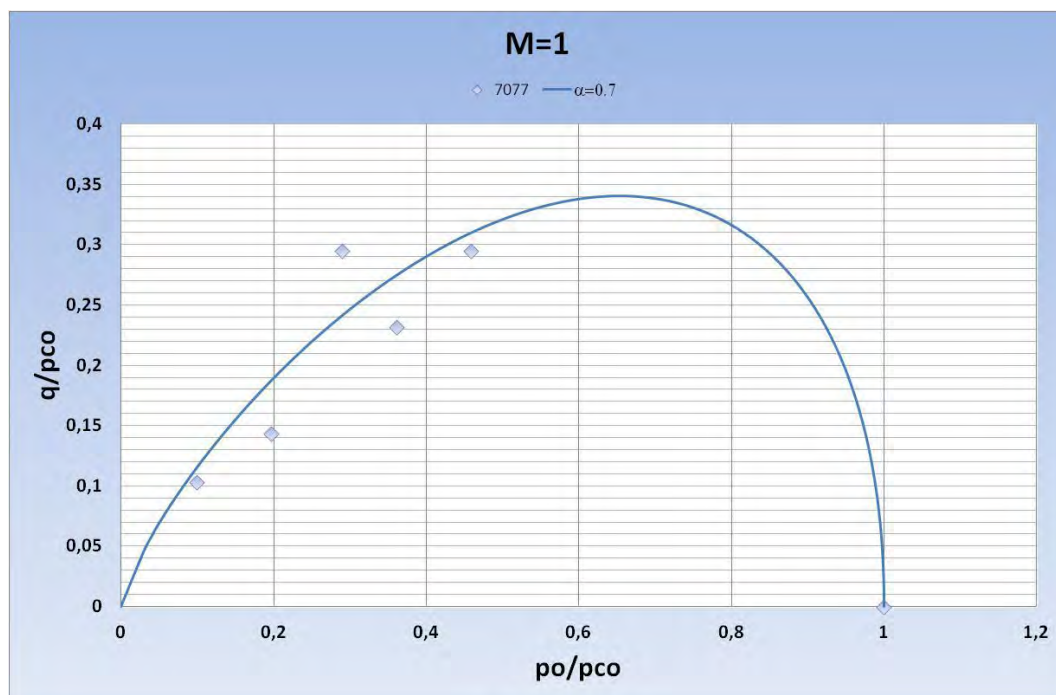


Fig. 6.60: Curvas de colapso no asociada y aditivas para los lapillis alterados (LPT-M). Muestra 7077.

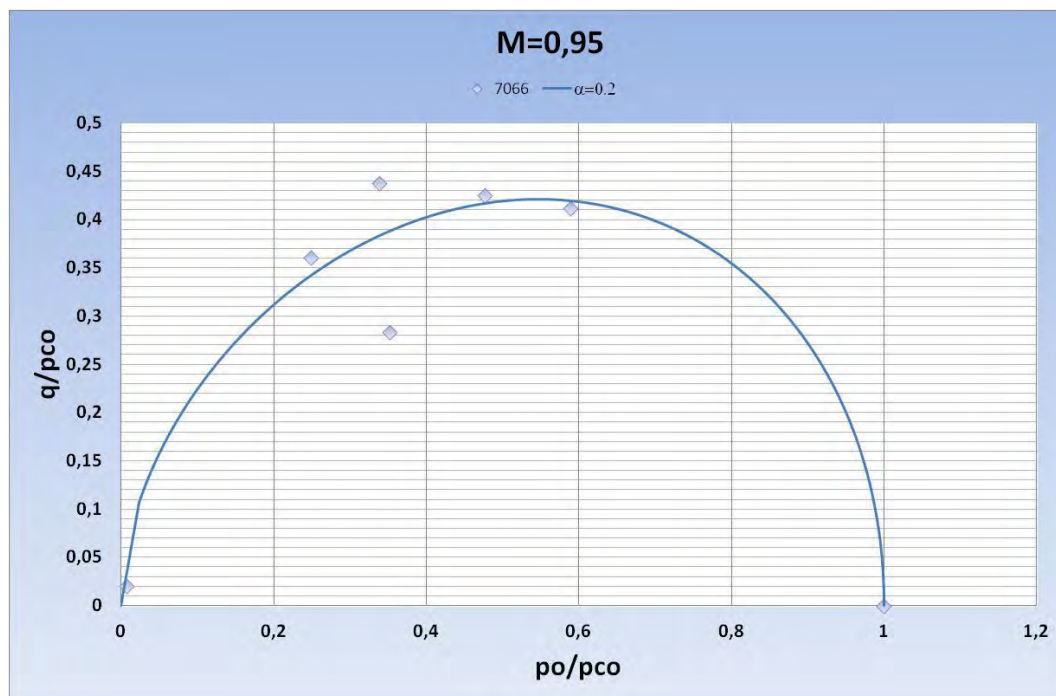


Fig. 6.61: Curvas de colapso no asociada y aditivas para los lapillis alterados (LPT-M). Muestra 7066.

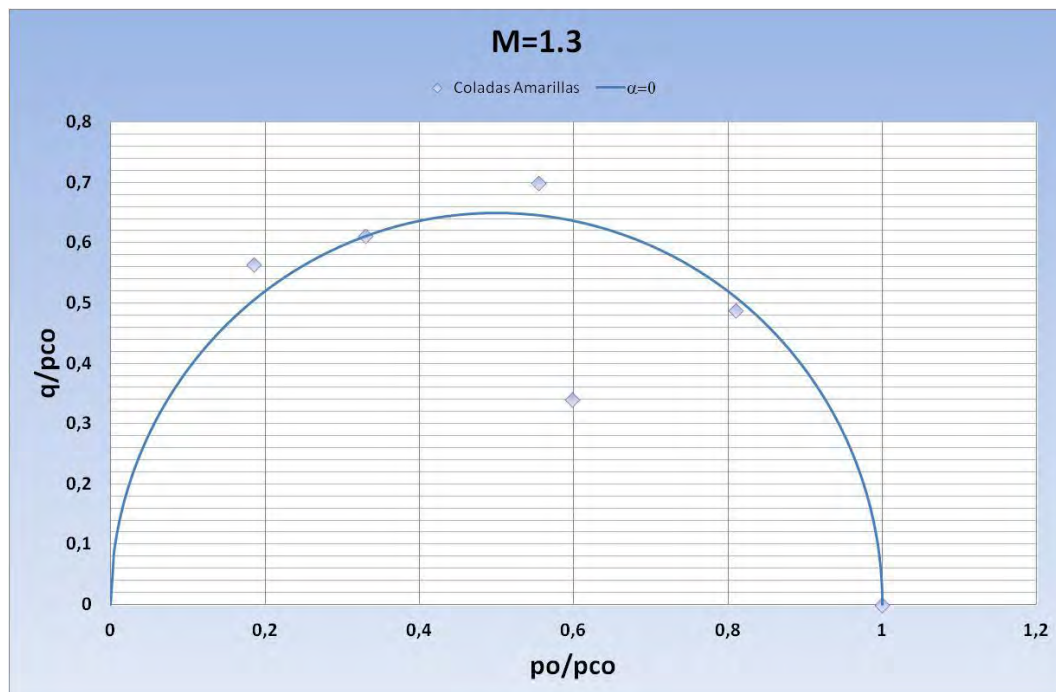


Fig. 6.62: Curvas de colapso asociada y aditivas para las coladas Amarillas.

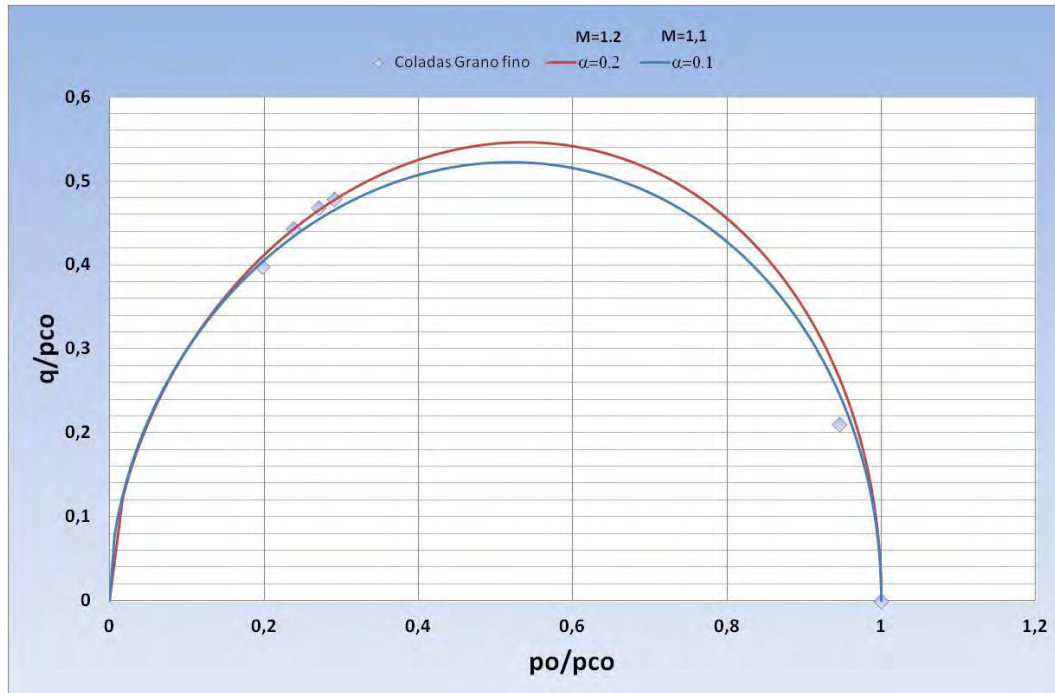


Fig. 6.63: Curvas de colapso no asociada y aditivas para las coladas da Grano fino.

6.5.2 Curvas de fluencia asociadas.

Para el caso en el que: $-1 < \lambda \leq 1$, las curvas asociadas tienen la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{q}{p_{c0}}\right)^2 = \frac{M_F^2}{\lambda} \left(\frac{p_0}{p_{c0}}\right) \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{c0}}\right)^\lambda\right]$$

Ecuación 2: Ecuación de la curva de colapso para dilatancia asociada.

Para el caso de $\lambda=0$, la ecuación anterior tendría la siguiente forma:

$$\frac{q^2}{p_{c0}^2} = -M_F^2 \frac{p_0}{p_{c0}} \ln\left(\frac{p_0}{p_{c0}}\right)$$

A continuación se muestran las diferentes curvas de fluencia obtenidas para varios tipos de piroclastos (Fig. 6.64-Fig. 6.70).



Fig. 6.64: Curvas de fluencia asociada para la M-7072, correspondiente a una lapilli débilmente soldada (LPDT).

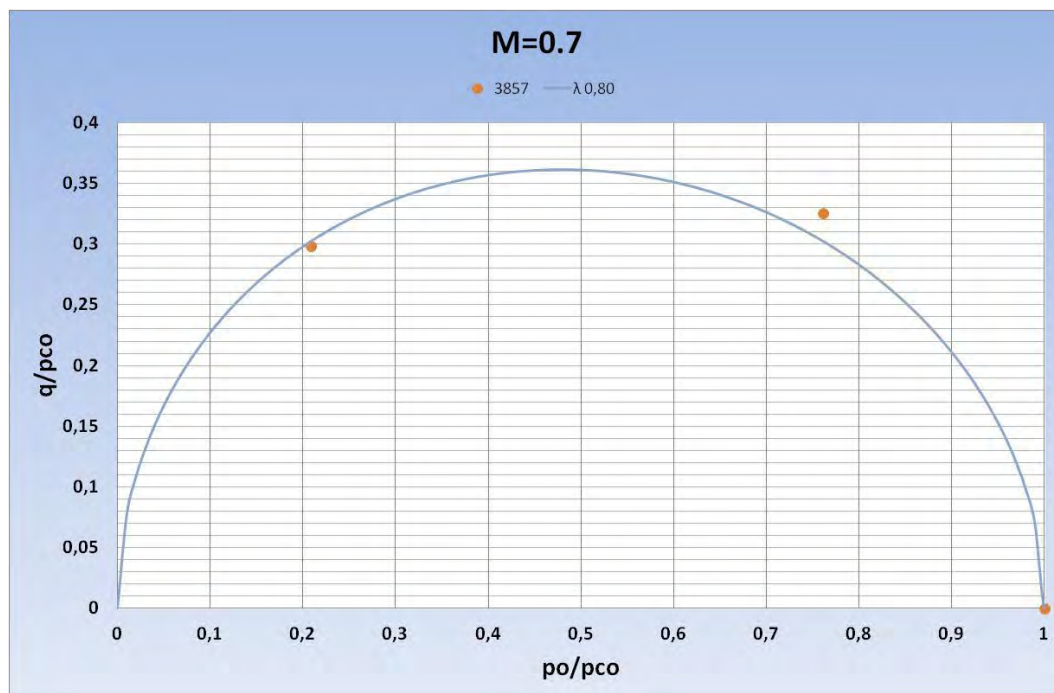


Fig. 6.65: Curvas de fluencia asociada para la M-3857, correspondiente a una lapilli soldada (LPT).

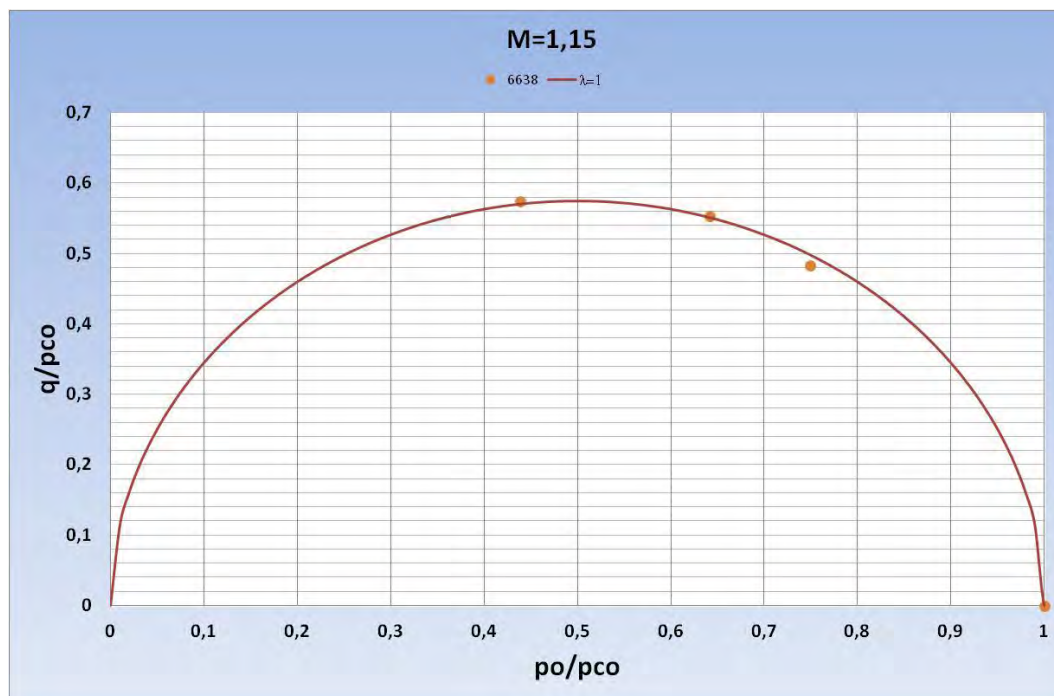


Fig. 6.66: Curvas de fluencia asociada para la M-6638, correspondiente a una pómez soldada (PZT).

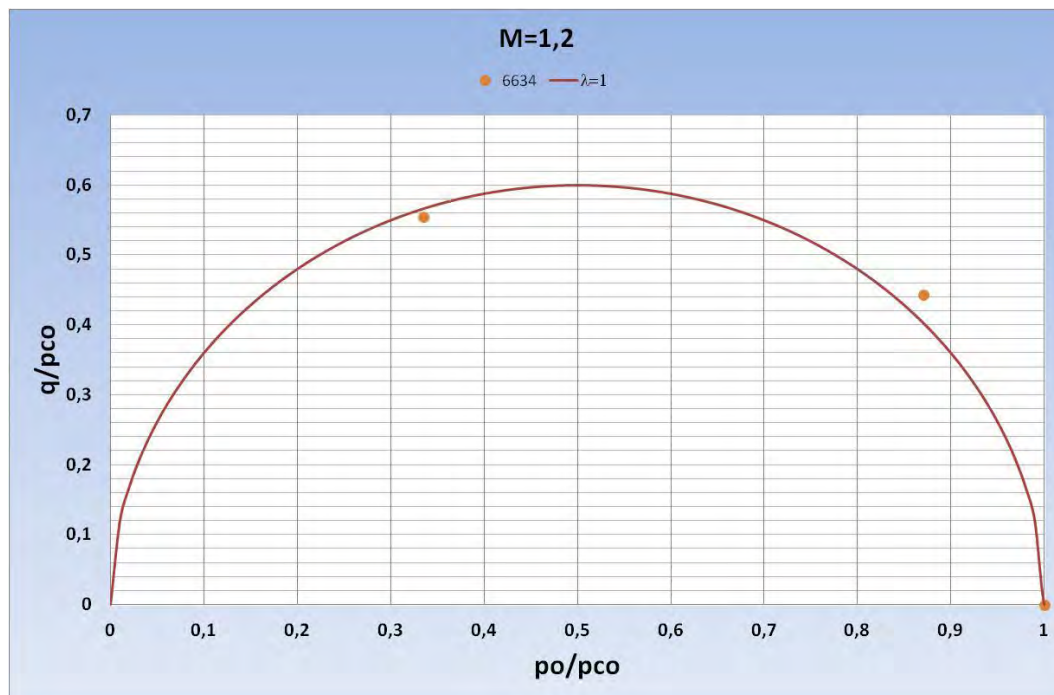


Fig. 6.67: Curvas de fluencia asociada para la M-6634, correspondiente a una pómez soldada (PZT).

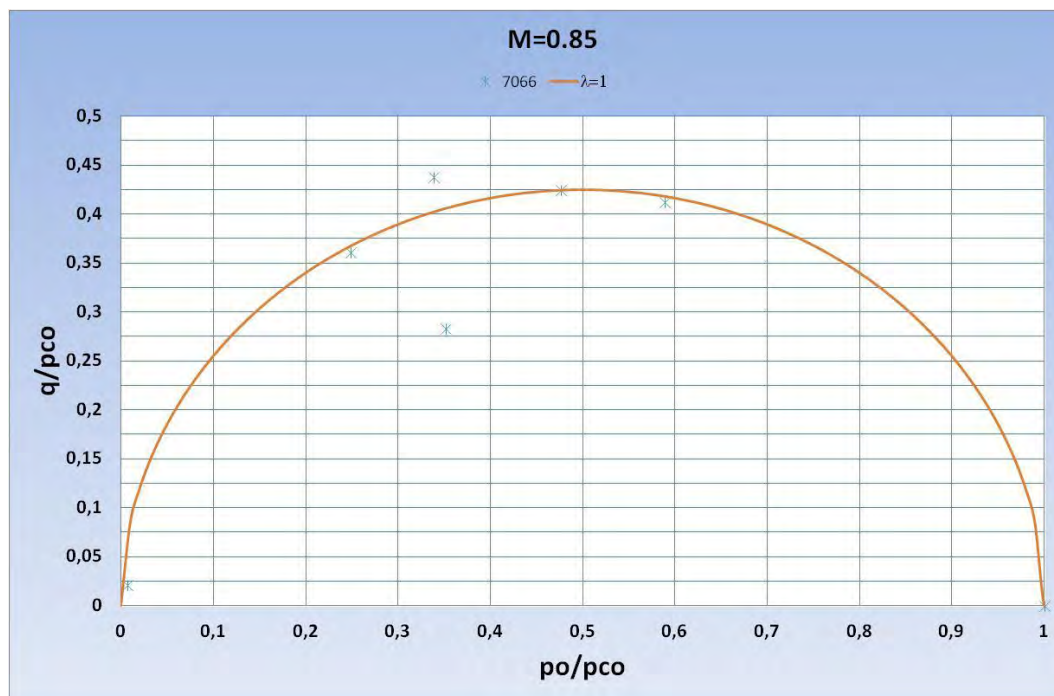


Fig. 6.68: Curvas de fluencia asociada para la M-7066, correspondiente a una lapilli alterada (PZT-M).

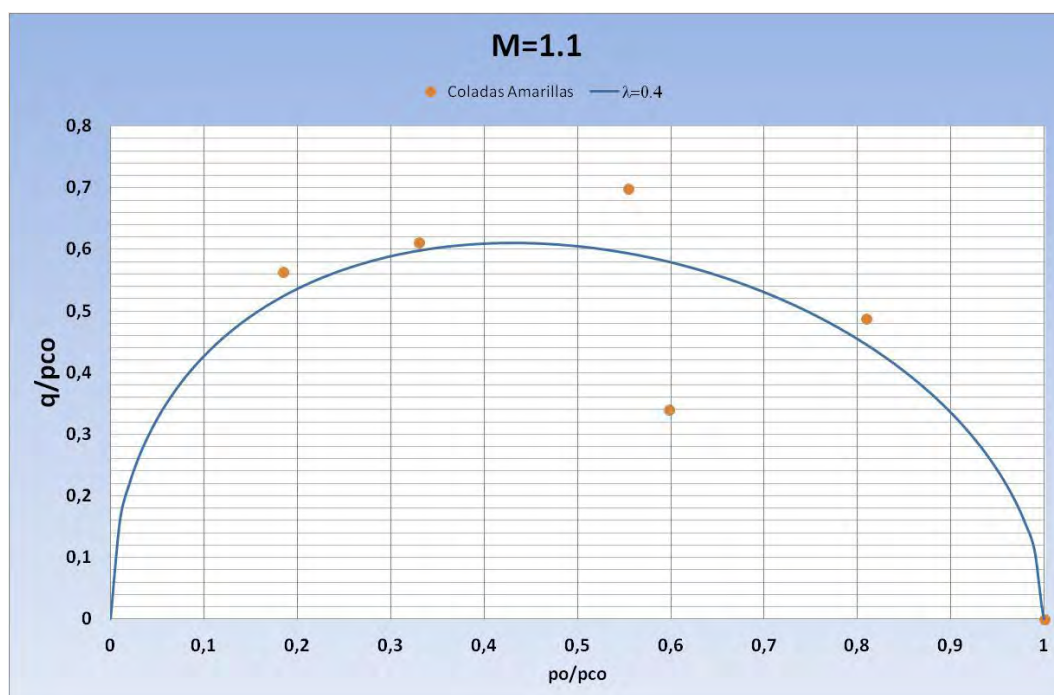


Fig. 6.69: Curvas de fluencia asociada para las coladas Amarillas.

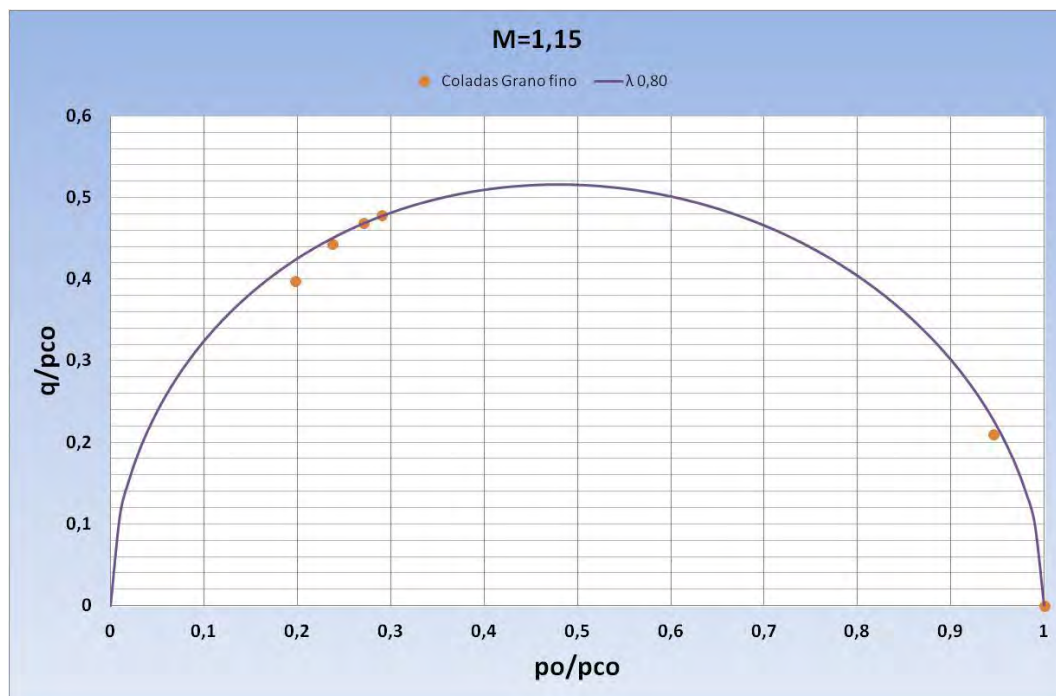


Fig. 6.70: Curvas de fluencia asociada para las coladas de Grano fino.

CAPÍTULO 7

RESUMEN Y CONCLUSIONES



ÍNDICE

7.1	RESUMEN	1-2
7.2	CONCLUSIONES.....	2-5

7.1 RESUMEN

A continuación se va a resumir todos los trabajos llevados a cabo durante esta investigación:

1. Geología de zonas volcánicas:

En primer lugar se ha realizado un resumen sobre los ambientes volcánicos, las clasificaciones más utilizadas para las rocas volcánicas, los diferentes productos derivados de una erupción volcánica, etc., con el fin de dar una idea general sobre la geología que engloba los materiales que se investigan en esta tesis.

2. Resumen bibliográfico sobre el comportamiento mecánico de las rocas piroclásticas débiles:

Se ha realizado una revisión bibliográfica relativa al estado del conocimiento actual acerca del comportamiento mecánico de los piroclastos de baja densidad. Aunque se tratan de coladas y oleadas piroclásticas, que son materiales con diferente génesis que los estudiados en esta tesis, su estructura es similar a la de los piroclastos de caída y su comportamiento esfuerzo-deformacional es también similar sólo que a diferente escala, por lo que conocer su comportamiento ha ayudado a avanzar en el estudio de los piroclastos de caída. De esta revisión se obtuvieron los datos de ensayos de las diferentes coladas analizadas en el Capítulo 5 y Capítulo 6.

La mayoría de los autores llegan a la conclusión de la gran influencia de la estructura de estos materiales en cuanto a la resistencia de los mismos.

La dispersión de los datos tanto en compresión isótropa como en triaxiales, puede ser atribuida en parte a los diferentes valores de porosidad inicial y en parte a diferentes grados de soldadura (enlace) y a otras características estructurales.

Diversos autores tales como: Aversa (1998), Serrano (1976, 1997) y Adachi (1981) han desarrollado diferentes curvas de fluencia para coladas piroclásticas, piroclastos de caída y oleadas piroclásticas, respectivamente.

3. Modelos propuestos:

Se han propuesto una serie de modelos de comportamiento de estos materiales, basados en diferentes principios. Los modelos propuestos son los siguientes:

- En primer lugar se propone un modelo teórico de comportamiento basado en el consumo energético de estos materiales durante la rotura, de forma análoga a las propuestas anteriores realizadas por Serrano (1976, 1997) y Serrano et al (2002b). El modelo propuesto supone un avance en la termodinámica de la rotura frente a los modelos anteriores de Serrano.

- En segundo lugar, se proponen unos modelos o criterios de rotura unificados, que en cierto modo suponen una extensión generalizada de los modelos de rotura de Coulomb (criterio Parabólico Colapsable) y de Hoek y Brown (criterio Elíptico Colapsable).
- Por último, se propone un modelo de ajuste para la obtención de la carga isotropa de colapso en función de la densidad seca de estos materiales. El modelo se deduce en primer lugar de forma teórica, considerando la macroestructura de poros de los materiales, y a continuación se ajusta a los resultados empíricos para obtener el ajuste de los parámetros que intervienen en el mismo.

Posteriormente se realiza el estudio del ajuste del comportamiento empírico de los materiales a estos modelos propuestos y se deduce cuál es el modelo de comportamiento que se ajusta mejor a los resultados empíricos de los que se dispone.

4. Búsqueda del “Piroclasto ideal”:

Debido a que los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados hasta la fecha, en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Serrano et al, 2007), presentaban una dispersión importante y, además, requerían de la realización de un mayor número de ensayos para poder precisar más las diferentes correlaciones obtenidas se planteó la búsqueda de un piroclasto “artificial”, fabricado en el laboratorio, cuyo comportamiento geotécnico pudiera ser parecido a los piroclastos reales, y con el que se pudieran fabricar una batería de probetas de mayor calidad y homogeneidad a las que someter a diferentes estados de carga, cuyos resultados pudieran presentar una menor dispersión y facilitar la búsqueda de leyes de resistencia.

Lo primero que se hizo fue buscar el conglomerante adecuado, para lo cual se realizaron ensayos de compresión simple en probetas con diferentes mezclas de materiales (fundamentalmente, cemento, escayola, y mezclas de cemento y bentonita) hasta lograr definir un material no muy resistente que mezclado posteriormente con los demás componentes pudiera dar una resistencia y deformabilidad similar a la de los piroclastos reales. Una vez definido el conglomerante (cemento y bentonita), el siguiente paso fue buscar el piroclasto ideal. Para ello se fabricaron numerosas probetas con diferentes dosificaciones de arlita y porexpan, además del conglomerante. Cuando se consiguió un material similar a los piroclastos reales se prosiguió con los ensayos en probetas cuyo proceso de fabricación fue análogo en todas ellas, con el fin de que fueran lo más homogéneas posible. Todos estos ensayos se realizaron con anterioridad a los de las muestras reales, que se ensayaron posteriormente, y fueron de gran utilidad para poner a punto tanto las técnicas de ensayo como los modelos de ajuste.

5. Caracterización geotécnica de los piroclastos de caída:

Para este estudio se recopilaban por un lado, datos obtenidos en el año 2007 (Serrano et al., 2007) y en el año 1976 (Uriel et al.1976, Serrano, 1976); y por otro lado, se realizó una nueva campaña de ensayos, constituida por 24 muestras en bloques traídas de diferentes partes de las Islas Canarias, con las que se tallaron más de 250 probetas de ensayo.

Paralelamente se recopilaban resultados obtenidos en diferentes estudios llevados a cabo en varios países sobre rocas piroclásticas, citadas y descritas en el Estado del Arte.

Se ha estudiado el ajuste de los modelos propuestos a todos los resultados de ensayo de los que se dispone, tanto de las muestras artificiales como de las reales, y tanto de las ensayadas en este trabajo como en los otros mencionados, examinando la bondad de los ajustes y los valores que se deducen de los diferentes parámetros, lo cual se expone en el siguiente apartado.

Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados en las nuevas muestras de piroclastos se pudieron mejorar las diferentes correlaciones obtenidas en el año 2007 y se obtuvieron otras de igual importancia en la obra civil. En el próximo apartado se adjuntan las más relevantes.

7.2 CONCLUSIONES

Del estudio realizado se pueden extraer como principales conclusiones las siguientes, agrupadas en relación a diferentes aspectos:

1. Porosidad del material

-En relación a la macroporosidad de estos materiales se ha confirmado la existencia de diferentes tipos de porosidad, ya definidos anteriormente (CEDEX, 2007, Santana et al, 2008) y descritos en el Capítulo 3 (Grupo Español, año 2007), principalmente: porosidad “reticular”, “vacuolar”, “mixta” y porosidad “matricial” o “no macroporos”.

Del estudio realizado se concluye que:

- Las lapillis presentan una porosidad de tipo “mixto”, caracterizada por una porosidad interparticular de tipo “reticular” y una porosidad intraparticular de tipo “vacuolar”.
- Las pómez presentan una porosidad que se puede definir como de tipo “reticular”, ya que aunque a nivel de intrapartícula también poseen una porosidad vacuolar, ésta es microscópica y, por tanto, poco relevante en el comportamiento de estos materiales.

-La estructura de estos materiales y, por tanto, su macroporosidad influye mucho en su comportamiento geotécnico.

2. Propiedades químicas

-Se ha comprobado que todas las muestras ensayadas tienen una composición química acorde con la definida para los materiales procedentes de las islas Canarias y, por tanto, acorde con su procedencia. En la Fig. 5.10 (Capítulo 5, pág. 5.22) se ha representado el diagrama TAS de todas las muestras estudiadas, donde se confirma este hecho.

3. Propiedades mecánicas

-En las Figs. 5.16, 5.20 y 5.22 (Capítulo 5) pueden verse los valores obtenidos de las resistencias a compresión simple, módulos de deformación y de compresibilidad, resistencia a compresión isótropa y resistencias al corte para diferentes situaciones de confinamiento, para los materiales estudiados en este trabajo. Estos valores han servido para definir los intervalos de resistencia habituales para los distintos materiales que se incluyen en la clasificación propuesta.

-Los piroclastos de baja densidad, ya se trate de coladas, oleadas o piroclastos de caída, presentan una estructura parecida y un comportamiento esfuerzo-deformacional formalmente similar, aunque con diferente escala.

-En relación con la resistencia se ha visto que en los ensayos de compresión isotrópica, aquellas muestras con partículas menos resistentes (pómez) presentan un colapso menos brusco, más gradual que las más resistentes (lapillis soldadas), en las que se produce un colapso brusco.

-Por otra parte, se ha comprobado que cuando los materiales piroclásticos se presentan alterados, es decir con matriz alrededor de las partículas rellenando, en diferentes porcentajes, los huecos de la porosidad reticular, no colapsan a bajas presiones de confinamientos (<3.5 MPa). Se cree que esto es debido a que esta matriz ayuda a que estos materiales se comporten de forma plástica bajo ensayos triaxiales, y esto se refleja en la forma de rotura de las mismas, ya que rompen en planos horizontales.

-De los resultados obtenidos tanto en los ensayos de resistencia a compresión simple como Triaxiales (TIS y Compresión Isótropa) se ha llegado a la conclusión de que en la rotura por compresión simple el efecto predominante (y prácticamente único) es el de la rotura de los contactos entre partículas. Por otra parte, en la rotura por compresión isotrópica, aunque también se produce la rotura de los contactos entre partículas, el efecto predominante es, sin embargo, el de rotura de las propias partículas, lo cual se ha comprobado observando las muestras tras su rotura. Entre ambos extremos, en los ensayos triaxiales de rotura por desviador (TIS) parece que ésta se produce por una combinación de ambos fenómenos, predominando uno u otro según que la presión de confinamiento sea baja (rotura de contactos principalmente), o alta (rotura de partículas principalmente) y, probablemente también, de la relación entre la resistencia de la soldadura y la de la partícula, que quizá podría cuantificarse por la relación entre la resistencia a compresión simple y la isotrópica de un material.

4. Formas de rotura

-Se han deducido de forma teórica (Capítulo 4, apartado 4.31.5) las formas de rotura esperables en estos materiales, dependiendo de los valores de carga aplicados (Capítulo 4, Figura 4.13).

-Se ha comprobado experimentalmente que se producen estas formas de rotura para las siguientes formas de carga (Capítulo 5, pág. 5.34-5.35):

- En compresión simple: planos de rotura verticales o cuasi-verticales.
- En compresión triaxial: planos de rotura formando ángulo de $45+v/2$ con la vertical, siendo v el ángulo de dilatación del material.

- Con valores elevados de la presión de confinamiento se deja de verificar la teoría de la plasticidad (lo cual se ha demostrado teóricamente) y se produce una desestructuración completa de la muestra en la rotura.
- En la región fronteriza de altas presiones de confinamiento en la cual se está a punto de dejar de verificar la teoría de la plasticidad se producen unos planos de rotura horizontales o cuasi-horizontales, como también se ha demostrado teóricamente.

5. Materiales artificiales o “piroclastos ideales”

-Tras numerosos esfuerzos por crear un material artificial o “piroclasto ideal” que tuviera un comportamiento más homogéneo que el de los materiales reales y sirviera para confirmar su comportamiento teórico, se decidió reproducir materiales artificiales con dos tipos de porosidad: “reticular” y “vacuolar”.

-Con los materiales artificiales fabricados y a pesar de las numerosas pruebas realizadas y del riguroso método de fabricación no se ha conseguido evitar la dispersión de resultados. No obstante, los materiales que mejor se han comportado y con los que se han conseguido ajustar los métodos de ensayo y los criterios de rotura unificados propuestos (Elíptico Colapsable y Parabólico Colapsable) han sido los siguientes:






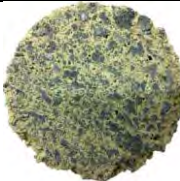

- Con porosidad reticular: probetas formadas por cemento, bentonita, arlita y porexpan.
- Con porosidad vacuolar: probetas formadas por cemento, bentonita y porexpan.

Tanto la composición de estas probetas como su método de fabricación se han descrito en el Apéndice 1 del Capítulo 5.

6. Clasificación de los materiales

-A la vista del estudio realizado se ha considerado conveniente proponer una nueva clasificación de estos materiales, basada en la clasificación previa de la *Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del gobierno de Canarias* (2011) (Capítulo 5, Tabla 5.8), ampliando el número de litotipos y definiendo unos rangos de valores esperables de los parámetros más relevantes desde el punto de vista geotécnico, que se considera que puede tener una gran utilidad práctica. Esta clasificación es la que se recoge a continuación:

PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE LOS PIROCLASTOS DE CAÍDA

LITOTIPOS (Tamaño de partículas)				Grado Soldadura	γ_d (kN/m ³)	CSP (MPa)	P _{CI} (MPa)
Depósitos piroclásticos	Piroclastos Basálticos	Lapillis (LP) (2-64mm)		LPT	8-18	0.3-8	>1
				LPDT	5-10.5	<0.3	0.2-2
				LPS	-	-	-
		Escorias (ES) (>64mm)		EST	9-13	1-4	>1.5
				ESDT	7-9	<1	<1.5
				ESS	-	-	-
		Cenizas basálticas (CB) (<2mm)		CBT	15-23	1-11	-
				CBDT	10-15	<1	>5*
				CBS	-	-	-
	Piroclastos sálícos	Pómez (PZ) (2-64mm)		PZT	5-7	0.1-1	0.1-0.5
				PZDT	<5	<0.1	<0.1
				PZS	-	-	-
		Cenizas sálícas (CS) (<2mm)		CST	>9.5	>1	-
				CSDT	<9.5	<1	>4*
				CSS	-	-	-
Depósitos de piroclastos alterados	Piroclastos Basálticos	LPT-M		-	9-18	0.1-3	7.5-12.5*
		CBT-P		-	-	-	-
	Piroclastos sálícos	PZT-M		-	8-13	0.2-2.5	3.3-7.5*
		CST-P		-	10-17	0.6-4.5	>8*

*Presiones de colapso obtenidas mediante ajuste.

**En gris aparecen aquellos materiales que no se han podido ensayar por falta de muestras.

7. Criterios de rotura

-En cuanto a los criterios de rotura unificados propuestos, se ha obtenido en todos los casos un buen ajuste al modelo Parabólico Colapsable, tanto con los resultados de los materiales artificiales como con los de los reales. El modelo Elíptico Colapsable ha tenido un buen ajuste para las muestras artificiales. Sin embargo, en las reales el resultado ha sido dispar, obteniéndose un buen ajuste para algunas muestras pero no ajustándose a otras.

- En cuanto al ajuste de los modelos teóricos energéticos, el modelo aditivo se ajusta bastante bien para algunas muestras, como puede verse en el Apéndice 2, aunque ha habido otras muestras en las cuales el ajuste no ha sido tan bueno. Por su parte, el modelo multiplicativo no se ha ajustado bien.

-Por tanto, se han planteado varios modelos para la obtención de un criterio de rotura que podrían ser válidos para su aplicación práctica. De entre todos ellos se ha optado por el modelo unificado Parabólico Colapsable, derivado del modelo de Mohr-Coulomb, por ser el más sencillo de todos, lo cual facilita la obtención de sus parámetros, y por ajustarse bien a todas las muestras ensayadas. La forma de este modelo es la siguiente (Fig. 7.1):

$$q = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_{co}} \right)^\lambda$$

Donde:

$$-M = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0}$$

$$-p_{co} = p_c^* + t$$

-t= resistencia a la tracción

- p_c^* =Presión de colapso

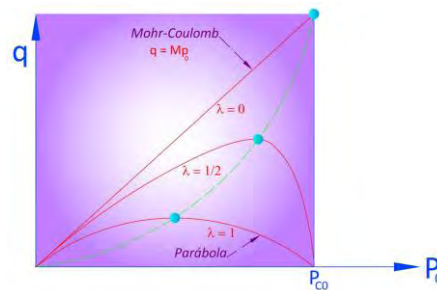


Fig. 7.1: Familias de curvas de rotura para el caso Parabólico Colapsable.

-A partir de estos ajustes se recomiendan unos valores de los diferentes parámetros resistentes de uso práctico en proyectos llevados a cabo en zonas volcánicas, cuando no se pueda disponer de la realización de los ensayos necesarios para poder obtener estos valores en laboratorio para cada terreno concreto en estudio. Dichos valores se recogen en la tabla adjunta:

MATERIAL (densidad, kN/m ³)	M	$\zeta = t/p_{co}$ (%)	λ
LPT (8-18)	2.4	9	1
LPDT (5-10.5)	2.4	5	0.7
PZT (5-7)	2	18	0.8
EST (9-13)	3	1.6	0.22
LPT-M (9-18)	1.4	3	1
PZT-M (8-13)	2		1
CBT (15-23)	2.6	2	1
CSDT (>9)	1.8	5	1
CST-P (10-17)	3	1	1
COLADAS ROJAS (12)	3	6	1
COLADAS AMARILLAS (10)	1.8	23	1
POZZOLANA NERA (14)	2	0.05	0.8
GRANO FINO (12-13)	2	0.13	0.8

8. Correlaciones propuestas.

-Se han obtenido una serie de correlaciones que permiten estimar como primera aproximación los valores de resistencia a compresión simple (σ_c) y de presión isotrópica de colapso (p_{ci}) de estos materiales en función de la densidad seca (γ_d) y de la porosidad de los mismos (n). Los gráficos más significativos de estas correlaciones se presentan a continuación:

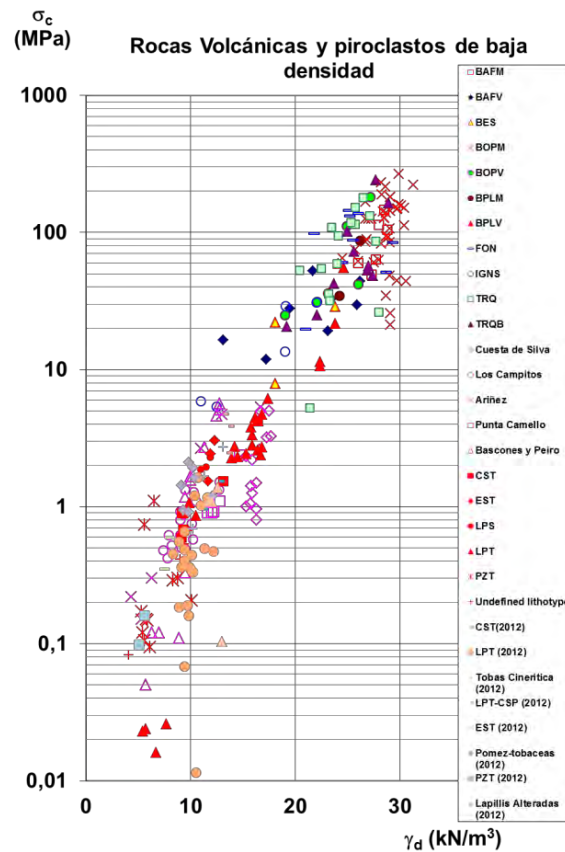


Fig. 7.2: Relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad seca de diferentes rocas volcánicas y piroclastos de baja densidad (modificada de Serrano et al.2007). N° total de muestras: 256.

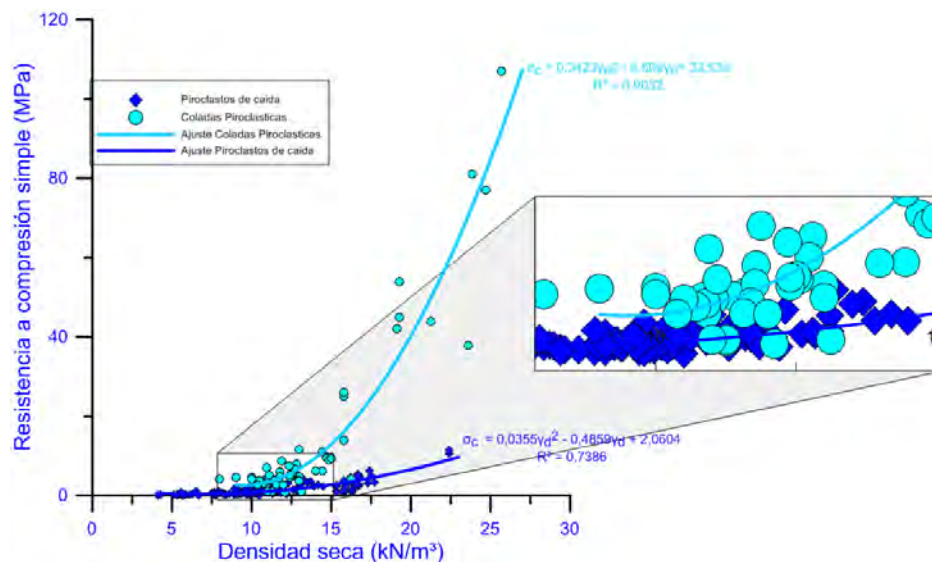


Fig. 7.3: Ajuste de la resistencia de compresión simple con la densidad seca para los piroclastos de caída y las coladas piroclásticas. El ajuste para las coladas piroclásticas se realizó teniendo en cuenta que la densidad mínima que se ha encontrado en estos materiales es de 8 kN/m³ y para el caso de los piroclastos de caída, la densidad mínima es de 4,1 kN/m³.

-Se propone una ecuación única para la carga isotropa de colapso de las rocas macroporosas, de la forma:

$$p_{ci} = L\gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^\alpha$$

Donde G, L y α son parámetros a determinar con ensayos.

Del estudio realizado se han obtenido los valores recogidos en la Fig.7.4, para los materiales estudiados.

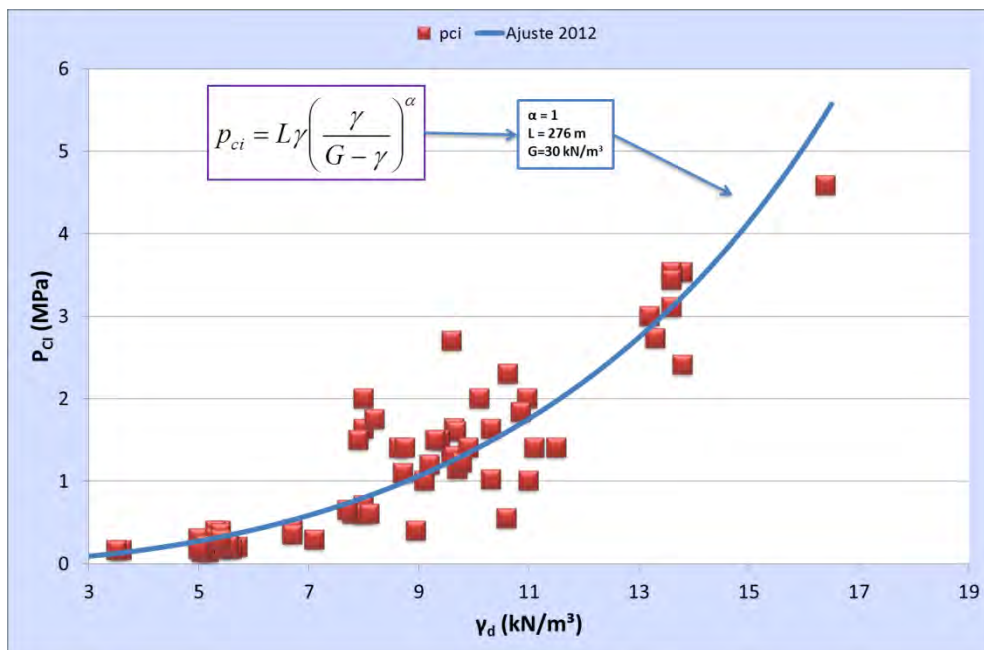


Fig.7.4: Ajuste entre la presión de colapso (p_{ci}) la densidad seca (γ_d) en piroclastos de caída.

La dispersión de los resultados puede ser atribuida en parte a los diferentes valores de porosidad inicial y en parte a diferentes grados de soldadura (enlace) y a otras características estructurales.

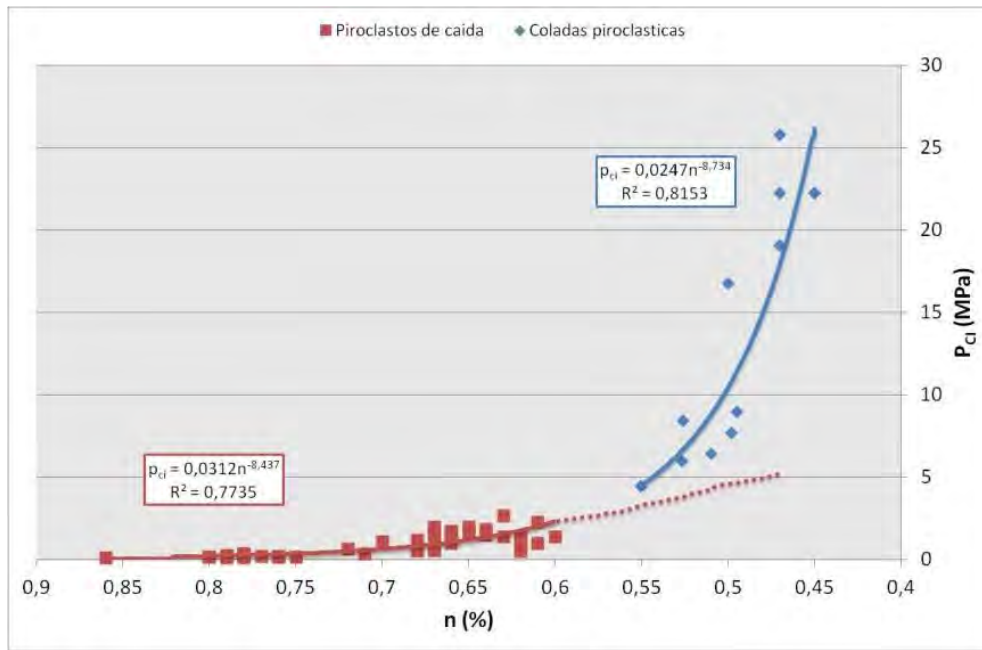


Fig. 7.5: Ajuste entre la presión de colapso (p_{ci}) y la porosidad (n), tanto coladas piroclásticas como en piroclastos de caída.

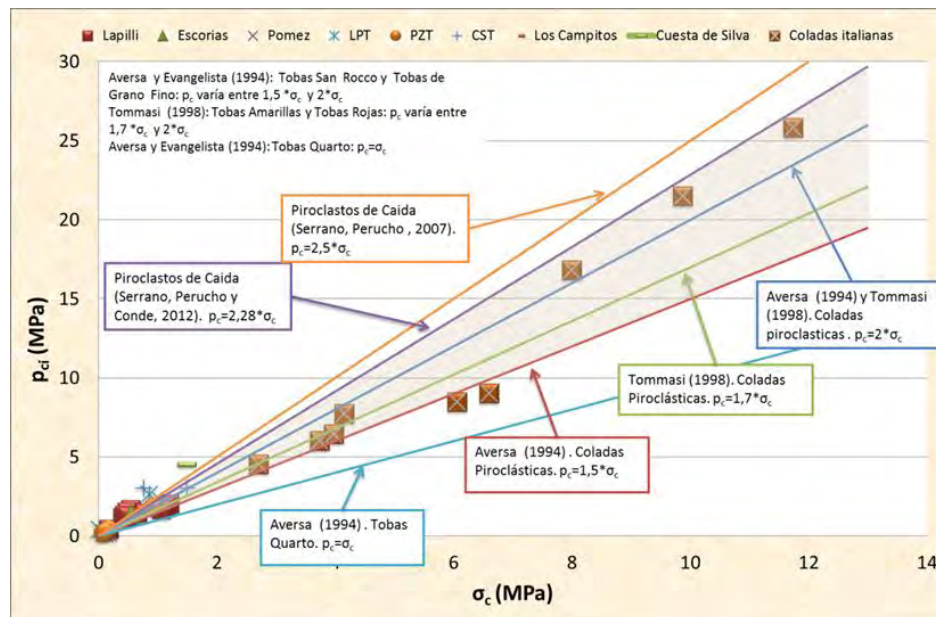


Fig. 7.6: Diferentes relaciones entre la presión de colapso, p_c , y la resistencia a compresión simple, σ_c , en distintos piroclastos. La parte sombreada es la zona con mayor ocurrencia en los datos de ensayos tanto recopilados como realizados durante esta investigación.

CAPÍTULO 8

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



8.1 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como resultado del estudio realizado a lo largo de esta investigación y a la vista de las conclusiones obtenidas, se presentan como principales aspectos a tener en cuenta en futuras líneas de investigación los siguientes:

- Como primer punto importante para avanzar esta investigación está el de continuar con los ensayos para obtener un mayor número de resultados y así poder mejorar los diferentes ajustes y curvas de colapso, y aumentar así su fiabilidad. Además esto ayudaría a mejorar la división realizada en la nueva clasificación geotécnica para estos materiales.
- Continuar avanzando en el estudio de la influencia de la estructura de los materiales tanto en su resistencia como en su posibilidad de colapso. En concreto, aspectos tales como: macroporosidad (tamaño y morfología de los poros, tamaño relativo en relación al de las partículas,...), imbricación de las partículas entre sí (porcentaje de superficie de las mismas en contacto con otras partículas), resistencia de la soldadura entre partículas, forma, resistencia o/y alteración de dichas partículas, relleno parcial o total de los macroporos en materiales alterados por depósitos de cristales o partículas debido a la circulación de fluidos, etc.

En concreto, en relación con la resistencia se ha visto que en los ensayos de compresión isótropa, aquellas muestras con partículas menos resistentes (pómez) presentan un colapso menos brusco, más gradual que las más resistentes (lapillis soldadas), en las que se produce un-colapso brusco.

Por otra parte, se ha comprobado que cuando los materiales piroclásticos se presentan alterados, es decir, con matriz alrededor de las partículas o rellenando en diferentes porcentajes los huecos de la porosidad reticular, estos materiales no colapsan a bajas presiones de confinamientos (<3.5 MPa). Se cree que esto es debido a que esta matriz ayuda a que estos materiales se comporten de forma plástica bajo ensayos triaxiales, y esto se refleja en la forma de rotura de las mismas, ya que rompen en planos horizontales. Se considera que una línea de investigación futura sería la de realizar más ensayos en este tipo de muestra, a mayores presiones de confinamiento para poder medir su presión de colapso y ver cómo influye en la resistencia los diferentes porcentajes de matriz.

Además, en cuanto al ensayo de compresión isótropa, se debería mejorar la forma en la que se realiza el ensayo, ya que es un ensayo dependiente de la fuerza que se le dé al pistón, es decir, tal y como se han llevado a cabo estos ensayos tienen una cierta dependencia del operario que realice el ensayo.

- Efecto escala: realizar ensayos a diferentes escalas, con probetas mayores y

en campo. Este es un tema importante debido a que algunas muestras ensayadas durante esta investigación presentaban un tamaño de partículas grande y ya que el diámetro con el que se realizaban los ensayos es fijo por carecer de una máquina para ensayar muestras de mayor tamaño a altas presiones de confinamiento, el comportamiento de dichas muestras (Escorias) es muy distinto que los demás y no se puede tener certeza de que esto sea producto solo de su estructura, ya que son las únicas con porosidad vacuolar, o si este comportamiento es anómalo debido a que las dimensiones no eran las correctas y se tenga efecto escala.

➤ De los resultados obtenidos tanto en los ensayos de resistencia a compresión simple como Triaxiales (TIS y Compresión Isótropa) se ha llegado a la conclusión de que en la rotura por compresión simple el efecto predominante (y prácticamente único) es el de la rotura de los contactos entre partículas. Por otra parte, en la rotura por compresión isótropa, aunque también se produce la rotura de los contactos entre partículas, el efecto predominante es, sin embargo, el de rotura de las propias partículas, lo cual se ha comprobado observando las muestras tras su rotura. Entre ambos extremos, en los ensayos triaxiales de rotura por desviador (TIS) parece que ésta se produce por una combinación de ambos fenómenos, predominando uno u otro según que la presión de confinamiento sea baja (rotura de contactos principalmente), o alta (rotura de partículas principalmente) y, probablemente también, de la relación entre la resistencia de la soldadura y la de la partícula, que quizá podría cuantificarse por la relación entre la resistencia a compresión simple y la isótropa de un material. Como línea futura de investigación se propone comprobar estas afirmaciones sobre nuevas muestras ensayadas, así como sobre diferentes tipos de piroclastos, confirmando si es un fenómeno general, tratando de cuantificar el fenómeno, profundizando en la relación entre la resistencia a compresión simple del material, su resistencia a tracción y su resistencia a compresión isótropa.

➤ Continuar avanzando en los modelos de ajuste de comportamiento de estos materiales. Concretamente, en el modelo energético de comportamiento conviene seguir indagando si es preciso modificar alguna hipótesis con el fin de lograr conseguir un mejor ajuste, que permita una definición concreta de valores para los distintos parámetros que intervienen y para los diferentes materiales.

➤ Investigar la resistencia a tracción de estos materiales, para poder definir con mayor precisión la forma de la curva de fluencia en esta zona, lo cual ayudaría a definir con mayor precisión global toda la curva.

➤ Estudiar la posible influencia de la humedad y grado de saturación de las muestras en su resistencia y deformación, en especial, en aquellas que presentan alteración.

- Sobre la clasificación propuesta: sería conveniente confirmar los intervalos de variación definidos de los parámetros geotécnicos de los diferentes tipos de piroclastos incluidos con un mayor número de ensayos, con el fin de aumentar su precisión, en especial en los materiales tipo EST y de las Cenizas.
- Avanzar en el estudio teórico que incluye el cálculo de los empujes del terreno sobre muros, la estimación de los coeficientes de seguridad de taludes, tanto homogéneos como heterogéneos, y el cálculo de las cargas de hundimiento y admisibles de cimentaciones superficiales cimentadas tanto en terrenos colapsables como en terrenos con cavernas, todos ellos muy frecuentes en zonas volcánicas. Se considera que el estudio debería continuar avanzando hacia el cálculo de las cargas de hundimiento y admisibles para cimentaciones profundas, por medio de pilotes.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



ÍNDICE

9.1	BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 2: GEOLOGÍA	1-2
9.1.1	Texto	1-2
9.1.2	Páginas web.....	1-4
9.1.3	Figuras.....	1-4
9.2	BIBLIOGRAFÍA CAPITULOS 3-7.....	2-5
9.2.1	Texto	2-5
9.2.2	Fotos.....	2-11

9.1 BIBLIOGRAFÍA CAPITULO 2: GEOLOGÍA

9.1.1 Texto

1. Alonso, J. J. (1989). Estudio volcanoestratigráfico y volcanológico de los piroclastos sálicos del Sur de Tenerife., Universidad de la Laguna. Secretariado de publicaciones.
2. Ancochea, E.; Fúster, J. M.; Ibarrolas, E.; Cendrero, A.; Cantagrel, J. M.; Jamond, C. (1990), "Volcanic Evolution of the Island of Tenerife (Canary Islands) in the Light of New K-Ar Data.," *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, 44, 231-249.
3. Ancochea, E., Hernán, F., Cendrero, A., Cantagrel, JM., Fúster, JM., Ibarrola, E., Coello, J., (1994). Constructive and destructive episodes in the building of a young oceanic Island, La Palma, Canary Island, and génesis of the Caldera de Taburiente. *J Volcanol Geotherm Res* 60: 243-262.
4. Ancochea, E. and F. Hernán (2004). Canarias. Rasgos generales. *Geología de España*. Cap.8, Sociedad Geológica de España e IGME.
5. Ancochea, E., Brändle, JL., Huertas, MJ., Hernán, F., Herrera, R. (2008). Dike-swarms, key to the reconstruction of major volcanic edifices: The basic dikes of La Gomera (Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 173: 207-216.
6. Anguita, F., Márquez, Á., Castañeiras, P., and Hernán, F. (2002), *Los Volcanes De Canarias. Guía Geológica E Itinerarios.*, ed. E. Rueda, Editorial Rueda.
7. Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology*, Blackwell Publishing.
8. Burnham, C. W. (1972). "The energy of explosive eruption." *Earth, Mineral Sci. (Pennsylvania State Univ.)* 41: 69-70.
9. Cas, R. and J. Wright (1987). *Volcanic Successions, Modern and Ancient*. London Boston Sydney Wellington.
10. Colombo, F. and J. Martí (1992). "Depósitos volcano-sedimentarios." *Arche, A. (Ed.) Sedimentología I (C.S.I.C Madrid)*: 273-547.
11. Fisher, R. V. (1966). "Rocks composed of volcanic fragments and their classification." *Earth, Mineral Sci. Rev.* 1: 287-298.
12. Fisher, R. V. (1979). "Models for pyroclastic surges and pyroclastic flows." *J.Volc.Geot.Res* 6: 305-318.
13. Fisher, R. V. and H.-U. Schmincke (1984). *Pyroclastic Rocks*. Berlín, Springer-Verlag.
14. González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M., and Seisdedos, J. (2006), *Caracterización Geomecánica De Los Materiales Volcánicos De Tenerife.*,

- ed. M. A. R. G. N°8, Madrid: Instituto geológico y minero de España.
15. Macdonald, G. A. (1972). *Volcanoes*. New Jersey, Prentice-Hall. Englewood Cliffs.
 16. Martí, J. (1989), "Materiales Volcánicos Y Mecanismos Eruptivos.," in "Los Volcanes Y La Caldera Del Parque Nacional Del Teide (Tenerife, Islas Canarias)", ed. E. c. V. A. y. J. Coello., Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación- ICONA.
 17. Németh, K. and U. Martin (2007). *Practical Volcanology. Lectures notes for understanding volcanic rocks from field based studies*. Budapest, Geological Institute of Hungary.
 18. Ollier, C. (1969). *Volcanoes*. Cambridge, Massachusetts and London, England, The Mit Press.
 19. Ortiz, R. *Introducción a la física de las erupciones.*, Dto. Volcanología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC.
 20. R. W. Le Maitre (editor), A.S., B. Zanettin, M. J. Le Bas, B. Bonin, P. Bateman, G. Bellieni, A. Dudek, S. Efremova, J. Keller, J. Lamere, P. A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, e A. R. Woolley, (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Subcommittee of the Systematics of Igneous Rocks., Cambridge University Press.
 21. Schmid, R. (1981). "Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommittee of the systematics of Igneous Rock." *Geology* 9(1): 41-43.
 22. Schmincke, H.U., Sumita, M. (2010). *Geological Evolution of the Canary Islands. Cities on Volcanoes 6th*. Tenerife 2010. Ed. Görres-Verlag.
 23. Sheridan, M. F. and K. H. Wohletz (1981). "Hydrovolcanic explosions: the systematics of water pyroclastic equilibration." *Science* 212: 1387-1389.
 24. Sparks, R. S. and G. P. L. Walker (1973). "The ground surge deposits: a third type of pyroclastic rocks." *Nature phys. Sci.* 241: 62-64.
 25. Sparks, R. S. and G. P. L. Walker (1977). "The significance of vitric-enriched air fall ashes associated with crystal -enriched ignimbrites." *J.Volc.Geot.Res* 2: 329-341.
 26. Sparks, R. S. and L. Wilson (1976). "A model for the formation of ignimbrites by gravitational column collapse." *J.Geol.Soc Lond.* 132: 441-452.
 27. Taddeucci, J., Pompilio, M., and Scarlato, P. (2004), "Conduit Processes During the July-August 2001 Explosive Activity of Mt. Etna (Italy): Interferences from Glass Chemistry and Crustal Size Distribution of Ash Particles.," *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, 137, 33-54.
 28. Walker, G. P. L. (1981). "Plinian eruptions and their products." *Bull. Volc.* 44: 223-240.
 29. White, J. D. L. and B. F. Houghton (2006). "Primary volcanoclastic rocks."

Geology 34(8): 677-680.

30. Wilson, C. J. N. (1986). "Pyroclastic flow and ignimbrites." Sci. Prog. (Oxf.) 70: 171-207.
31. Wohletz, K. H. and M. F. Sheridan (1983). "Hydrovolcanic explosions II. Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones." Am.J. Sci. 283: 385-413.
32. Yamamoto, T., Takarada, S., and Suto, S. (1993), "Pyroclastic Flows from the 1991 Eruption of Unzen Volcano, Japan," Bulletin of volcanology, 55, 166-175.

9.1.2 Páginas web

1. http://www.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/1_3_1.html
2. <http://www-personal.umich.edu/~jmpares/Igneous.html>
3. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/GL45C/1/material_docente/bajar?id_material=129095
4. <http://www.uwgb.edu/dutchs/Petrology/cipw01.htm>
5. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/GL41C/1/material_docente/bajar?id_material=119987
6. www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/sedimentologia/.../piroclasticas.pdf
7. http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/3B8EAADA-8A2F-46A3-8759-5D17AF06B721/32451/riesgovolcanico_br.pdf
8. http://beta.ceicin.org.ar/IMG/pdf/ROCAS_PIROCLASTICAS.pdf
9. http://www.insugeo.org.ar/libros/cg_15/capitulo_95.htm

9.1.3 Figuras

1. http://es.wikipedia.org/wiki/Domo_de_lava
2. http://volcano.oregonstate.edu/vwdocs/vwlessons/lava_pics/aa_90.jpg
3. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/11/Los_Organos_La_Gomera.JPG/290px-Los_Organos_La_Gomera.JPG
4. <http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/78/Nur05018.jpg>
5. http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/vulcanologia/productos_volcanicos_lavas_e_structuras_singeneticas.htm

9.2 BIBLIOGRAFÍA CAPITULOS 3-7

9.2.1 Texto

1. Adachi, T., Ogawa, T., and Hayashi, M. (1981), "Mechanical Properties of Soft Rock and Rock Mass.," *Pros.*, 10 TH ICSMFE., 1, 527-530.
2. Asprone, D., Cadoni, E., Prota, A., and Manfredi, G. (2009), "Dynamic Tensile Behavior of Neapolitan Yellow Tuff.," *DYMAT*, 1359-1365.
3. Aversa, S., and Evangelista, A. (1993), "Some Aspects of the Mechanical Behaviour of "Structured" Soils and Soft Rocks.," *International symp. on Geotechnical engineering of hard soils and rocks. Athens.*, 1, 359-366.
4. Aversa, S., and Evangelista, A. (1998), "The Mechanical Behaviour of a Pyroclastic Rock: Yield Strength and "Destruction" Effects. ," *Rock mechanics and Rock engineering*, 31, 25-42.
5. Brown, S. J. A., and Smith, R. T. (2004), "Crystallization History and Crustal Inheritance in a Large Silicic Magma System: 206pb/238u Ion Probe Dating of Zircons from the 1.2 Ma Ongatiti Ignimbrite, Taupo Volcanic Zone" *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, 247-257.
6. Brown, S. J. A., Wilson, C. J. N., Cole, J. W., and Wooden, J. (1998), "The Whakamaru Group Ignimbrites, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: Evidence for Reverse Tapping of a Zoned Silicic Magmatic System," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 84, 1-37.
7. Burland, J. B. (1990), "On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays.," *Géotechnique*, 40, No.3, 329-378.
8. Calcaterra, D., Cappelletti, P., Langella, A., Colella, A., and Gennaro, M. d. (2004), "The Ornamental Stones of Caserta Province: The Campanian Ignimbrite in the Medieval Architecture of Casertavecchia.," *Journal of Cultural Heritage*, 5, 137-148.
9. Cattoni, E., Cecconi, M., and Pane, V. (2007), "Geotechnical Properties of an Unsaturated Pyroclastic Soil from Roma.," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 403-414.
10. Cecconi, M. (1998), "Sample Preparation of a Problematic Pyroclastic Rock.," *Problematic Soils, Yanagisawa, Moroto & Mitachi*.
11. Cecconi, M., DeSimone, A., Tamagnini, C., and Viggiani, G. M. B. (2002), "A Constitutive Model for Granular Materials with Grain Crushing and Its Application to a Pyroclastic Soil.," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, 26, 1531-1560.
12. Cecconi, M., Scarapazzi, M., and Viggiani, G. (2010), "On the Geology and the Geotechnical Properties of Pyroclastic Flow Deposits of the Colli Albani," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69, 185-206.

13. Cecconi, M., and Viggiani, G. (1998), "Physical and Structural Properties of a Pyroclastic Soft Rock," *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy., 1, 85-91.
14. Cecconi, M., and Viggiani, G. (2006), "Pyroclastic Flow Deposits from the Colli Albani," in *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Taylor & Francis.
15. Cecconi, M., Viggiani, G., and Rampello, S. (1998), "An Experimental Investigation of the Mechanical Behaviour of a Pyroclastic Soft Rock.," *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy., 1, 473-481.
16. Cecconi, M., and Viggiani, G. M. (2001), "Structural Features and Mechanical Behaviour of a Pyroclastic Weak Rock.," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, 25, 1525-1557.
17. CEDEX (2007), "Caracterización geotécnica de los piroclastos canarios débilmente cementados". Informe final. Abril.
18. Consejería de obras públicas, transportes y política territorial del gobierno de canarias (2011). "Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias".
19. Consejería de obras públicas, transportes y política territorial del gobierno de canarias (2011). "Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias".
20. Cristescu, N., and Gioda, G. (1994), *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials*, Ed. Springer.
21. DaCosta, A., Wright, C., Ye, Y., MacLaughlin, M., and Hudyma, N. (2007), "Development of Upper and Lower Bounds to Describe Engineering Properties as a Function of Macroporosity," in *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, Taylor & Francis, pp. 821-826.
22. del Potro, R., and Hürliemann, M. (2008), "Geotechnical Classification and Characterisation of Materials for Stability Analyses of Large Volcanic Slopes," *Engineering Geology*, 98, 1-17.
23. Dibben, S. C., Jefferson, I. F., and Smalley, I. J. (1998), "The Monte Carlo Model of a Collapsing Soil Structure.," *Problematic Soils*, Yanagisawa, Moroto & Mitachi.
24. Dobson, P., and Nakagawa, S. (September 2005), "Summary of Rock-Property Measurements for Hong Kong Tuff Samples.," Technical, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. University of California.
25. Drucker, D. C. (1959), "A Definition of Stable Inelastic Materials.," *Trans. A.S.M.E. Jour. Appl.Mech.*, 26, 101-106.
26. Elliott, G. M., and Brown, E. T. (1985), "Yield of a Soft, High Porosity Rock," *Géotechnique*, 35, N°4, 413-423.
27. Esposito, L., and Guadagno, F. M. (1998), "Some Special Geotechnical Properties of Pumice Deposits," *Bulletin of Engineering Geology and the*

- Environment, 57, 41-50.
28. Evangelista, A., and Aversa, S. (1994), "Experimental Evidence of Non-Linear and Creep Behavior of Pyroclastic Rocks". Visco-plastic behavior of geomaterials. Ed. Springer.
 29. Evangelista, A., Aversa, S., Pescatore, T. S., and Pinto, F. (1998), "Soft Rocks in Southern Italy and the Role of Volcanic Tuffs in the Urbanization of Naples.," The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy., 3, 1243-1267.
 30. Gens, A., and Potts, D. M. (1988), "Modelos Elasto-Plásticos De Estado Crítico Para Análisis Numéricos De Problemas Geotécnicos. I-Fórmulas Básicas Y Principales Modificaciones.," Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería., 4, 497-522.
 31. González de Vallejo, L.I., and Ferrer, M. (2006), Caracterización Geomecánica De Los Materiales Volcánicos De Tenerife., ed. M. A. R. G. N°8, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
 32. González de Vallejo, L.I., Hijazo, T., Ferrer, M. (2008) "Engineering Geological Properties of the Volcanic Rocks and Soils of the Canary Islands". Soils and Rocks, São Paulo, 31(1): 3-13, January-April, 2008.
 33. Hobbs, D. W. (1966), "A Study of the Behavior of Broken Rock under Triaxial Compression, and Its Application to Mine Roadways.," Int.J.Rock Mech.Mining Sci., 3, 11-43.
 34. Kahraman, S., Gunaydin, O., and Fener, M. (2005), "The Effect of Porosity on the Relation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 584-589.
 35. Krenk, S. (2000), "Characteristic State Plasticity for Granular Materials. Part I: Basic Theory.," International Journal of SOLIDS and STRUCTURES, 37, 6343-6360.
 36. Leroueil, S., and Vaughan, P. R. (1990), "The General and Congruent Effects of the Structure in Natural Soils and Weak Rocks. ," Géotechnique, 40 (3), 467-488.
 37. Lopez Corral, A. M. (1978), "Fenómenos De Colapso: Descripción.," Boletín de información/ Laboratorio del transporte y Mecánica del suelo. Madrid., 127, 25-37.
 38. M.A.Kanji and V.R.Galván (1998). "Correlation of properties of Soft Rocks." The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy. 1: 239-244.
 39. Maranini, E. and M. Brignoli (1998). "An analytical viscoplastic model for the creep behaviour of a porous weak rock." The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy. 2: 697-705.
 40. McDowell, G. R. and M. D. Bolton (1998). "On the micro mechanics of

- crushable aggregates." *Géotechnique* 48(5): 667-679.
41. McDowell, G. R., Bolton, M. D., and Robertson, D. (1996), "The Fractal Crushing of Granular Materials," *Journal of the mechanics and physics of solids*, 44, 2079-2102.
 42. Moon, V. G. (1993). "Geotechnical characteristics of ignimbrite: A soft pyroclastic rock type." *Engineering Geology* 35(1-2): 33-48.
 43. Moon, V. G. (1993). "Microstructural controls on the geomechanical behaviour of ignimbrite." *Engineering Geology* 35(1-2): 19-31.
 44. Moroto, N., Hasegawa, A., Yang, J., and Nagui, T. (1998), "A New Engineering Classification of Volcanic Cohesive Soils for Earthworks," *Problematic Soils*, Yanagisawa, Moroto & Mitachi.
 45. Mueller, S.; Scheu, B.; Kueppers, U.; Spieler, O.; Richard, D.; Dingwell, D. B. (2011), "The Porosity of Pyroclasts as an Indicator of Volcanic Explosivity," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203, 168-174.
 46. Nova, R., Castellanza, R., and Tamagnini, C. (2003), "A Constitutive Model for Bonded Geomaterials Subject to Mechanical and/or Chemical Degradation.," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, 27, 705-732.
 47. Orense, R., Zapanta, A., Hata, A., and Towhata, I. (2006), "Geotechnical Characteristics of Volcanic Soils Taken from Recent Eruptions," *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 129-161.
 48. Pellegrino, A. (1970), "Mechanical Behaviour of Soft Rocks under High Stresses.," *ISRM. II Congreso Internacional de Mecánica de Rocas. Tomo II*, Belgrado. R.3.25.
 49. Quane, S. L. and J. K. Russell (2005). "Ranking welding intensity in pyroclastic deposits." *Bull. Volcanol.* 67: 129-143.
 50. Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Gutiérrez, L. E., Olalla Marañón, C., Perucho Martínez, Á. y Serrano González, A. (2008). "Propiedades de las rocas volcánicas altamente cohesivas y de los macizos rocosos de las islas canarias". *VII Congreso Geológico de España. Geo-Temas* 10. pp: 1567-5172.
 51. Roscoe, K. H. and J. B. Burland (1968). On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. *Symposium on Engineering Plasticity*, Cambridge.
 52. Roscoe, K. H. and A. N. Schofield (1958). "On the yielding of soils." *Géotechnique* 8, No.1: 22-53.
 53. Roscoe, K. H., Schofield, A. N., and Wroth, C. P. (1958), "Mechanical Behaviour of an Idealized "Wet Clay". " *Proc. European Conf. Soil Mech. Fdn Engng*, Wiesbaden, 1962.
 54. Rotonda, T., Tommasi, P., and Boldini, D. (2010), "Geomechanical Characterization of the Volcaniclastic Material Involved in the 2002 Landslides at Stromboli.," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering., Febrero 2010, 389-401.
55. Rotonda, T., Tommasi, P., and Ribacchi, R. (2002), "Physical and Mechanical Characterization of the Soft Pyroclastic Rocks Forming the Orvieto Cliff," Workshop on Volcanic Rocks. Eurock 2002.
 56. Sahaphol, T. and S. Miura (2005). "Shear moduli of volcanic soils." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25(2): 157-165.
 57. Salas, J. A. J. and J. L. d. J. Alpañez (1975). Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas., Rueda.
 58. Sangrey, D. A. (1972b). "Naturally cemented sensitive soils." Géotechnique 22 No.1: 139-152.
 59. Santana, M., De Santiago, C., Perucho, A. y Serrano, A. (2008) "Relación entre características químico-mineralógicas y propiedades geotécnicas de piroclastos canarios. VII Congreso Geológico de España. Geo-Temas 10, pp: 1567-5172.
 60. Savin, N.G. (1961), "Stress concentration around holes." Pergamon Press.
 61. Schofield, A. N. and C. P. Wroth (1968). Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill.
 62. Serrano, A. (1972). "Informe Geotécnico Sobre El Terreno De Cimentación De La Presa De Los Campitos. Laboratorio del transporte y mecánica del suelo". No publicado, Madrid.
 63. Serrano, A. (1997). "Mecánica de Rocas". Madrid, E.T.S.I.C.C.P. UPM.
 64. Serrano, A., Olalla, C. (1998), "Comportamiento de materiales volcánicos". XII Semana de la carretera. La carretera como obra singular. III Encuentro nacional de la carretera. Islas Canarias.
 65. Serrano, A., Olalla, C., and Perucho, Á. (2002a), "Mechanical Collapsible Rocks," Workshop on Volcanic Rocks. Eurock 2002.
 66. Serrano, A., Olalla, C., and Perucho, Á. (2002b), "Evaluation of Non-Linear Strength Laws for Volcanic Agglomerates." Workshop on Volcanic Rocks. Eurock 2002.
 67. Serrano A., Olalla C. y Perucho A. (2002c) "Planar failure surfaces on rock assuming a nonlinear strength law and constant dilatancy". ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions and Workshop on Volcanic Rocks, Eurock 2002. Funchal, 27 Nov.
 68. Serrano, A., Perucho, A., Estaire, J. (2007) "Slope stability in heterogeneous materials". ISRM 11th International Congress on the Second Half of Century of Rock Mechanics. Lisbon, 9-13 July, 2007.
 69. Serrano, A., Olalla, C. y Perucho, A. (2007) "Active and passive earth pressures on retaining wall assuming a non-linear strength criterion and constant dilatancy". ISRM 11th International Congress on the Second Half of Century of Rock Mechanics. Lisbon, 9-13 July, 2007.
 70. Serrano, A., Sandoval, G. y Perucho, A. (2007) "Displacements around circular tunnels in viscoelastoplastic media with non linear yield criterion and

- non-associated flow rule". ISRM 11th International Congress on the Second Half of Century of Rock Mechanics. Lisbon, 9-13 July, 2007.
71. Serrano, A., Perucho, A. y Estaire, J. (2007c) "Foundations on grounds with caverns". ISRM International Workshop on Volcanic Rocks. Ponta Delgada, Azores, 14 July, 2007.
 72. Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Gutiérrez, L. E., Olalla Marañón, C., Perucho Martínez, A. y Serrano González, A. (2007) "The volcanic rocks on the Canary Archipelago. Reviews on their geomechanical properties". ISRM International Workshop on Volcanic Rocks. Ponta Delgada, Azores, 14 July., 2007. LREC-Laboratorio Regional de Engenharia Civil.
 73. Serrano, A., Olalla, C., Perucho, A., Estaire, J., (2007) "Foundations in Volcanic Areas". XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnical Engineering in Urban Environments. Madrid, 24-27 September, 2007. ISBN: 978 90 5966 055 7. Millpress Rotterdam.
 74. Serrano, A., Olalla, C., and Perucho, Á. (2007b), "Shallow foundations on collapsible rocks", ISRM International Workshop on Volcanic Rocks. Ponta Delgada, Azores.
 75. Serrano, A., Olalla, C., Perucho, Á., and Hernández, L. (2007a), "Strength and deformability of low density pyroclasts." , ISRM International Workshop on Volcanic Rocks. Ponta Delgada, Azores.
 76. Serrano, A., Perucho, Á., and Conde, M. (2010), "Isotropic Collapse Load as a Function of the Macroporosity of Volcanic Pyroclasts.," 3rd International Workshop on Rock Mechanics and Geo-Engineering in Volcanic Environments.
 77. Serrano, A., Perucho, Á., and Conde, M. (2010), "Isotropic Collapse Load as a Function of the Macroporosity of Volcanic Pyroclasts," European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2010).
 78. Tommasi, P. and R. Ribacchi (1998). "Mechanical behaviour of the Orvieto tuff." The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. 2do International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks/Naples/Italy. 2: 901-909.
 79. Torrado, F. J. P., Soler, V., Carracedo, J. C., and Mangas, J. (1994), "Temperatura De Emplazamiento De Las Ignimbritas Roque Nublo (Gran Canaria, Islas Canarias) Mediante Técnicas Paleomagnéticas.," Estudios Geol., 50, 9-17.
 80. Uriel, S., and Serrano, A. (1976), "Propiedades Geotécnicas De Algunos Aglomerados Volcánicos En Las Islas Canarias. ," Mem. del Simposio Nacional de Rocas Blandas., Tomo I.
 81. Uriel, S., and Bravo, B. (1970), "Brittle and Plastic Failure of Rocks.," II Congress of the ISRM, R.3.20, Belgrado.
 82. Uriel, S., and Bravo, B. (1971), "La Rotura Frágil Y Plástica En Un Aglomerado Volcánico De Las Palmas De Gran Canaria.," I Congreso

hispano-luso-americano de geología económica. Sesión 5.

83. Uriel, S., and Serrano, A. (1973), "Geotechnical Properties of Two Collapsible Volcanic Soils of Low Bulk Density at the Site of Two Dams in Canary Island." 8th Congress I.S.S.M.F.E., I, 257-264.
84. Uriel, S., and Serrano, A. (1974), "Propiedades Geotécnicas De Los Suelos Volcánicos Colapsables De Baja Densidad En La Cimentación De Dos Presas En Las Islas Canarias (España)." Bolentín de información del laboratorio del transporte y mecánica del suelo. CEDEX, 104, 21-28.
85. Vernik, L., Bruno, M., and Bovberg. (1993), "Empirical Relations between Compressive Strenght and Porosity of Siliciclastic Rocks.," Int.J.Rock Mech.Mining Sci., 30, 677-680.
86. Verrucci, L., Rotonda, T., and Tommasi, P. (2011), "Caratteristiche Dinamiche E Di Compressibilità Di Una Pozzolana Debolmente Cementata Alla Scala Del Laboratorio.," Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica.
87. Wohletz, K., Orsi, G., and Vita, S. d. (1995), "Eruptive Mechanisms of the Neapolitan Yellow Tuff Interpreted from Stratigraphic, Chemical, and Granulometric Data.," Journal of Volcanology and Geothermal Research, 67, 263-290.
88. Wong, P. K. K., and Mitchell, R. J. (1975), "Yielding and Plastic Flow of Sensitive Clay.," Géotechnique, 25, 763-782.
89. Yokoyama, Y., Ueno, K., and Mizunuma, T. (1995), "Subsidence of Underground Quarries in Ohya District, Japan." Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague.

9.2.2 Fotos

1. http://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcat=27&idcap=201&idcon=725
2. <http://www.teara.govt.nz/en/geology-overview/10/1>

ANEJOS





ANEJO 1

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO. MUESTRAS
REALES Y MUESTRAS ARTIFICIALES.

ÍNDICE

A-1.1	INTRODUCCION	1-3
A-1.2	MUESTRAS ARTIFICIALES	2-4
A-1.2.1	Ensayo de compresión simple	2-4
A-1.2.1.1	Conglomerante	2-4
A-1.2.1.2	Muestras artificiales. Grupos BCAP y BCP	2-8
A-1.2.2	Ensayo de compresión isotrópica. Muestras BCAP	2-12
A-1.2.3	Gráfica resumen de los ensayos TIS. Valores máximos-mínimos y medios	2-15
A-1.3	PIROCLASTOS REALES	3-16
A-1.3.1	Resumen ensayos de compresión simple	3-16
A-1.3.2	Resumen ensayos de compresión isotrópica	3-18
A-1.3.3	Resumen ensayos triaxial TIS	3-19
A-1.3.4	Ensayos de laboratorio. Informe completo.....	3-25
A-1.3.4.1	Cenizas. M-5141	3-25
A-1.3.4.2	CST-P-3856.....	3-32
A-1.3.4.3	LPT.M-5142.....	3-35
A-1.3.4.4	LPT. M-3857.....	3-39
A-1.3.4.5	LPT. M-5143.....	3-42
A-1.3.4.6	LPT. M-6632.....	3-45
A-1.3.4.7	LPT. M-6631.....	3-47
A-1.4.1.2	LPT-CBT. M-6637.....	3-53
A-1.5.1.1	LPT. M-7068.....	3-55
A-1.5.1.2	LPT. M-7069.....	3-60
A-1.5.1.3	LPT. M-7072.....	3-66
A-1.5.1.4	LPT. M-7073.....	3-71
A-1.5.1.5	LPT. M-7075.....	3-77
A-1.5.1.6	LPT. M-7074.....	3-81
A-1.5.1.7	LPT. M-7066.....	3-87
A-1.5.1.8	LPT. M-7067.....	3-93
A-1.5.1.9	LPT. M-7078.....	3-99
A-1.5.1.10	EST. M-3825.....	3-106

A-1.5.1.11	PZT. M-6635 y 6636.....	3-108
A-1.5.1.12	PZT-M. M-6633.....	3-113
A-1.5.1.13	PZT.M-6634.....	3-123
A-1.5.1.14	PZT. M-6638.....	3-128
A-1.5.1.15	LPT-M. 7076.....	3-139
A-1.5.1.16	LPT-M. 7077.....	3-145
A-1.6	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS REALES. 6-150	
A-1.6.1	DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO MEDIANTE PICNÓMETRO DE GAS. (NORMA ASTM D5550-94)	6-150
A-1.6.1.1	Introducción	6-150
A-1.6.1.2	Fundamentos de la picnometría de helio.....	6-151
A-1.6.1.3	Descripción del equipo.....	6-153
A-1.6.1.4	Procedimiento experimental.....	6-155
A-1.6.2	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONATOS, SULFATOS SOLUBLES, MATERIA ORGÁNICA Y PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.....	6-158
A-1.6.2.1	Procedimiento experimental.....	6-158
A-1.6.3	CONTENIDO DE ÓXIDOS Y ELEMENTOS MAYORITARIOS EN MUESTRA, DETERMINADO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X 6-160	
A-1.6.3.1	Fundamento teórico.....	6-160
A-1.6.3.2	Campo de aplicación de la XRF.....	6-162
A-1.6.3.3	Sistema XRF empleado	6-162
A-1.6.3.4	Determinación del contenido de óxidos y elementos mayoritarios6-165	
A-1.6.4	Resultados obtenidos	6-166
A-1.6.5	DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN MUESTRA DE POLVO MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X	6-173
A-1.6.5.1	La Difracción de Rayos-X. Descripción del método	6-173
A-1.6.5.2	Equipamiento	6-175
A-1.6.5.3	Preparación de muestras.....	6-176
A-1.6.5.4	Análisis Experimental	6-177
A-1.6.5.5	Resultados	6-178
A-1.6.5.6	TABLA RESUMEN	6-204

A-1.1 INTRODUCCION

En este Anejo se recopilan todos los resultados de los ensayos tanto de caracterización (muestras reales) como de resistencia (en ambas, reales y artificiales) realizados a lo largo de toda esta investigación en las diferentes muestras estudiadas.

Los ensayos de caracterización fueron los siguientes:

1. Determinación del peso específico mediante picnómetro de gas.
2. Determinación del contenido en carbonatos, sulfatos solubles, materia orgánica y pérdidas por calcinación.
3. Contenido de óxidos y elementos mayoritarios en muestra, determinado mediante fluorescencia de rayos x.
4. Determinación de la composición mineralógica en muestra de polvo mediante difracción de rayos-x.

En cuanto a los ensayos de resistencia se llevaron a cabo ensayos de compresión simple, compresión isotropa y triaxiales especiales (TIS).

A-1.2 MUESTRAS ARTIFICIALES

A-1.2.1 Ensayo de compresión simple

A-1.2.1.1 Conglomerante

➤ GRUPO EPA:

Nº muestra	Dosificación Agua/Escayola	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	Esec σ_c (MPa)	Elineal (MPa)	E50% σ_c (MPa)	γ_d (kN/m³)
I	200/100	0,025	0,611	4,206	-	-	3,9
II	200/100	0,027	1,129	2,441	2,229	2,247	4,3
A	100/50	0,775	1,468	52,839	108,967	101,022	5
B	100/50	0,094	2,145	4,394	5,358	5,749	4,4
A-2	100/75	1,276	2,033	62,773	129,843	127,369	7,2
B-2	100/75	0,374	2,145	17,443	30,224	29,025	6,3
C-1	100/50	1,039	1,172	88,716	122,042	119,109	5,5
C-2	100/50	1,015	0,513	197,922	133,256	267,556	5,3
C-3	100/50	0,930	1,246	74,717	149,663	184,732	5,2
C-4	100/50	0,769	1,319	58,376	63,501	62,628	5,4
C-5	100/50	0,266	1,246	21,422	33,774	35,241	4
C-6	100/50	1,051	0,879	119,673	156,992	165,488	5,3
C-7	100/50	0,988	0,953	103,751	132,908	149,748	5,1
C-8	100/50	1,238	0,9	137,58	-	-	5,3
C-9	100/50	1,234	1,246	99,092	115,015	108,323	5,3
C-10	100/50	1,352	0,953	141,879	165,896	192,562	5,3
C3-1	100/50	1,286	1,1	116,997	-	-	5,6
C3-2	100/50	1,126	1,965	57,352	123,581	123,096	5,5
C3-3	100/50	1,102	1,232	89,492	120,122	102,032	5,3
C3-4	100/50	1,157	0,963	120,175	149,424	117,378	5,3

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

N° muestra	Dosificación Agua/Escayola	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	Esec σ_c (MPa)	Elineal (MPa)	E50% σ_c (MPa)	γ_d (kN/m³)
C3-5	100/50	1,264	1,471	85,955	114,333	103,335	5,3
C3-6	100/50	1,348	1,655	81,455	100,955	89,652	5,1
C3-7	100/50	1,176	2,456	47,891	110,847	84,511	4,9
C3-8	100/50	1,184	1,703	69,580	108,880	86,966	4,9
C3-9	100/50	1,170	1,5	78,022	-	-	4,9
C3-10	100/50	1,103	1,6	68,945	-	-	4,9
D-1	100/75	0,569	0,622	91,508	364,042	364,042	6,8
D-2	100/75	0,593	0,68	87,308	134,924	143,876	6,8
D-3	100/75	0,601	0,553	108,779	117,613	140,357	6,7
D-4	100/75	0,680	0,691	98,539	126,521	108,9304	6,9
D-5	100/75	0,775	0,276	280,898	265,266	305,089	7,2
D-6	100/75	2,477	0,967	256,220	-	-	6,8
D-7	100/75	2,447	0,967	253,102	294,924	342,780	6,9
D-8	100/75	2,358	1,174	200,871	269,992	283,423	6,9
D-9	100/75	2,321	1,3	178,594	-	-	6,9
D-10	100/75	2,504	0,414	604,997	1420,084	1839,630	7,3

➤ GRUPO CMT:

N° muestra	Dosificación Agua/Cemento	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	ESEC σ_c (MPa)	Elineal (MPa)	E50% σ_c (MPa)	γ_d (kN/m³)
CMT-1	100 / 50	0,944	3,23	29,235	22,958	25,216	9,6
CMT-2	100 / 100	0,852	2,195	38,837	43,174	34,342	10,8
CMT-4	100 / 150	1,874	1,071	174,985	233,340	223,122	11,2
CMT-5	100 / 200	4,982	0,9	553,567	-	172,323	13,6

➤ GRUPO CB:

Nº muestra	Dosificación Agua/Cemento/Bentonita	σ_c (MPa)	ε_{rot} (%)	$ES_{EC \sigma c}$ (MPa)	E_{lineal} (MPa)	$E_{50\% \sigma c}$ (MPa)	γ_d (kN/m ³)
CB-1	100 / 50 / 3	0,095	0,6	15,843	18,285	24,917	6,1
CB-2	100 / 50 / 7,5	0,134	0,9	14,9	-	-	6,1
CB-3	100 / 50 / 4,5	0,055	0,618	8,953	11,593	14,069	5,9
CB-4	100 / 100 / 2	1,767	1,096	161,301	222,080	140,518	9,3
CB-5	100 / 150 / 2	3,663	1,115	328,595	343,109	344,215	11,4
CB-6	100 / 100 / 4	2,144	1,021	210,045	218,692	217,156	9,6
CB-7	100 / 150 / 5	4,951	1,7	291,293	-	-	11,5
CB-8	100 / 100 / 3	1,609	0,976	164,930	198,512	186,192	9,5
CB-9	100 / 100 / 5	1,257	1,118	112,490	132,478	142,915	9,1
CB-10	100 / 100 / 6	1,347	1	134,789	-	139,075	9,3
CB-11	100 / 100 / 2	1,774	0,871	203,701	204,530	238,471	9,6
CB-12	100 / 100 / 3	1,239	0,596	208,046	200,887	294,472	9,3
CB-13	100 / 100 / 4	1,062	0,661	160,688	169,466	173,824	9,1
CB-14	100 / 100 / 5	1,368	1,069	128,028	176,326	186,683	8,9
CB-15	100 / 100 / 2	1,947	0,887	219,514	250,157	296,120	11,7
CB-16	100 / 100 / 2	1,499	0,759	197,592	352,000	230,727	9,5
CB-17	100 / 100 / 2	1,252	0,5	250,488	-	-	9,4
CB-18	100 / 100 / 2	1,668	0,4	417,195	-	-	9,4
CB-19	100 / 100 / 2	1,277	0,7	182,521	-	-	9,4
CAB-1	100 / 150 / 2	5,943	1,1	540,299	-	-	11,5
CAB-2	100 / 150 / 2	4,894	0,9	543,855	-	-	11,6
CAB-3	100 / 150 / 2	6,802	1,3	523,280	-	-	11,6
CAB-4	100 / 150 / 2	7,005	1	700,503	-	-	11,7
CAB-5	100 / 100 / 2	1,978	0,934	211,839	314,402	197,697	9,4
CAB-6	100 / 100 / 2	2,030	0,82	247,582	501,262	501,262	9,2

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Nº muestra	Dosificación Agua/Cemento/Bentonita	σ_c (MPa)	ε_{rot} (%)	$ES_{EC \sigma_c}$ (MPa)	E_{lineal} (MPa)	$E_{50\% \sigma_c}$ (MPa)	γ_d (kN/m³)
CAB-7	100 / 100 / 2	2,842	0,8	355,318	357,249	375,837	9,7
CAB-8	100 / 100 / 2	1,986	0,577	344,353	335,665	406,117	9,3
CAB-9	100 / 100 / 2	2,536	1,3	195,136	-	-	9,5
CAB-10	100 / 150 / 2	7,502	0,886	846,826	879,277	768,138	11,7
CAB-11	100 / 150 / 2	5,343	0,704	758,951	731,769	621,493	11,6
CAB-12	100 / 150 / 2	7,863	1	786,35	-	-	11,7
CAB-13	100 / 150 / 2	8,020	0,9	891,205	-	-	11,3
CAB-14	100 / 150 / 2	5,708	0,695	821,428	629,944	655,801	11,7
CAB-15	100 / 100 / 2	2,594	0,467	555,513	542,645	720,458	9,6
CAB-16	100 / 100 / 2	3,503	0,631	555,251	-	-	9,8
CAB-17	100 / 100 / 2	1,997	0,577	346,223	444,373	488,285	9,5
CAB-18	100 / 100 / 2	3,468	0,65	533,558	770,836	833,737	9,7
CAB-19	100 / 100 / 2	1,85998	0,5	371,996	451,319	445,582	9,3
CAB-20	100/100/3	2,555	0,4	638,955	-	-	9,5
CAB-21	100/100/3	2,080	0,3	693,533	-	-	9,7
CAB-22	100/100/3	1,712	0,5	342,448	-	-	9,3
CAB-23	100/100/3	3,250	0,5	650,13	-	-	9,6
CAB-24	100/100/3	2,1	0,6	350	-	-	9,5
CAB-25	100/100/4	2,483	0,5	496,622	-	-	9,5
CAB-26	100/100/4	2,055	0,4	513,872	-	-	9,4
CAB-27	100/100/4	2,97076	0,5	594,152	-	-	9,6
CAB-28	100/100/4	2,91818	0,5	583,636	-	-	9,8
CAB-29	100/100/4	2,94751	0,7	421,072	-	-	9,2

Las muestras CAB son aquellas realizadas con un cemento distinto.

A-1.2.1.2 Muestras artificiales. Grupos BCAP y BCP

➤ GRUPO BCAP:

Nº muestra	Dosificación Agua/Cemento/Bentonita/Arlita/Porexpan	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	$E_{SEC \sigma C}$ (MPa)	E_{lineal} (MPa)	$E_{50\% \sigma c}$ (MPa)	γ_d (kN/m³)
BCAP-1	100 / 150 / 2 / 266,29 / 1,93	0,505	0,7	72,201	83,289	89,721	7,3
BCAP-3	100 / 150 / 2 / 263,27 / 1,99	0,387	0,5	77,558	73,867	67,024	7,2
BCAP-7	100 / 150 / 2 / 206,11 / 2,61	0,267	0,5	53,484	53,059	47,75	6
BCAP-8	100 / 150 / 2 / 260,59 / 2,06	0,477	0,6	79,526	90,709	76,967	7
BCAP-12	100 / 150 / 2 / 260,16 / 1,87	0,690	0,6	115,103	79,558	138,12	7,7
BCAP-13	100 / 150 / 2 / 260,02 / 1,80	0,713	0,9	79,275	79,558	84,928	7,6
BCAP-15	100 / 150 / 2 / 260 / 1,80	0,602	0,7	86,075	99,084	79,289	7,5
BCAP-16	100 / 150 / 2 / 260 / 1,83	0,809	0,958	84,521	126,971	86,432	7,8
BCAP-19	100 / 150 / 2 / 260 / 1,78	0,506	0,539	93,968	113,986	79,156	7,2
BCAP-20	100 / 150 / 2 / 260 / 1,78	0,445	0,678	65,775	119,125	78,871	7,3
BCAP-23	100 / 150 / 2 / 260 / 1,82	0,448	0,5	89,644	-	-	5,8
BCAP-24	100 / 150 / 2 / 260 / 1,81	0,388	0,71	54,673	69,389	64,064	5,6
BCAP-27	100 / 150 / 2 / 260 / 1,79	0,688	1,006	68,455	107,822	102,6	7,4
BCAP-28	100 / 150 / 2 / 260 / 1,81	0,637	1,109	57,523	106,237	97,531	7,3
BCAP-31	100 / 150 / 2 / 260 / 1,75	0,726	0,734	99,035	103,595	88,812	7,3
BCAP-32	100 / 150 / 2 / 260 / 1,77	0,423	0,515	82,289	83,687	87,563	7
BCAP-35	100 / 150 / 2 / 260 / 1,85	0,743	0,408	182,110	229,292	206,399	7,4
BCAP-36	100 / 150 / 2 / 260 / 1,95	0,712	0,505	141,166	304,121	297,049	7,4
BCAP-39	100 / 150 / 2 / 260 / 1,8	0,474	0,375	126,618	201,644	180,173	7,4
BCAP-40	100 / 150 / 2 / 260 / 1,97	0,649	0,621	104,608	168,935	168,935	7,4
BCAP-43	100 / 150 / 2 / 260 / 1,55	0,796	0,848	93,981	115,207	96,616	7,3
BCAP-44	100 / 150 / 2 / 260 / 1,62	0,697	0,65	107,340	109,042	106,789	7,4
BCAP-47	100 / 150 / 2 / 260 / 1,84	0,597	0,745	80,257	127,115	93,428	7,2

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

BCAP-48	100 / 150 / 2 / 260 / 1,93	0,560	0,556	100,800	112,147	120,391	7,1
BCAP-51	100 / 150 / 2 / 260 / 1,77	0,665	0,431	154,401	244,974	237,725	7,2
BCAP-52	100 / 150 / 2 / 260 / 1,81	0,725	0,282	257,399	269,096	255,254	7,4
BCAP-55	100 / 150 / 2 / 250 / 1,86	0,405	0,346	117,270	121,171	122,079	7
BCAP-56	100 / 150 / 2 / 250 / 1,86	0,480	0,461	104,186	170,922	-	7,1
BCAP-59	100 / 150 / 2 / 160,09 / 1,81	0,367	0,432	85,178	85,182	87,615	5,7
BCAP-61	100 / 150 / 2 / 160,12 / 2,13	0,239	0,766	31,312	49,398	44,205	5,3
BCAP-62	100 / 150 / 2 / 160 / 2,15	0,290	1,1	26,361	-	-	5,5
BCAP-63	100 / 150 / 2 / 160,13 / 2,15	0,181	0,756	24,045	30,356	23,481	5,2
BCAP-70	100 / 150 / 2 / 160,14 / 2,16	0,418	1,208	34,627	37,309	36,711	6
BCAP-71	100 / 150 / 2 / 160,13 / 2,15	0,510	1,198	42,638	76,080	70,948	6,3
BCAP-72	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,498	1,313	37,969	73,561	68,672	6
BCAP-76	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,406	0,397	102,448	-	-	5,9
BCAP-77	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,284	0,213	133,469	133,469	129,222	5,6
BCAP-78	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,476	0,411	115,929	102,041	-	6,1
BCAP-80	100 / 150 / 2 / 177 / 1,95	0,287	0,3	95,843	-	-	5,6
BCAP-81	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,132	0,238	55,688	-	-	5,6
BCAP-84	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,358	0,59	60,738	67,290	49,773	5,8
BCAP-88	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,298	0,303	98,392	83,032	134,763	5,8
BCAP-89	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,155	0,2	77,89	-	-	5,4
BCAP-90	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,244	0,4	61,042	-	-	5,8
BCAP-111	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,205	0,223	92,336	111,457	79,199	5,4
BCAP-112	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,224	0,354	63,488	91,563	102,161	5,6
BCAP-115	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,773	0,499	155,058	296,808	278,583	5,9
BCAP-116	100 / 150 / 2 / 160 / 2,13	0,766	0,462	165,813	251,407	232,237	5,8
NBCAP-118	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,213	1,165	18,357	21,602	14,722	4,9
NBCAP-120	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,207	1,388	14,927	19,860	14,946	4,8
NBCAP-122	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,270	0,958	28,231	28,222	30,235	4,9

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

NBCAP-123	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,138	0,872	15,839	15,834	15,445	5
NBCAP-124	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,128	1,146	11,196	29,534	29,990	4,9
NBCAP-128	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,170	0,757	22,561	22,554	30,518	4,7
NBCAP-129	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,127	0,212	60,202	60,181	78,118	4,8
NBCAP-134	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,186	0,431	43,178	43,163	36,191	5
NBCAP-135	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,280	1,009	27,806	31,323	26,270	4,9
NBCAP-140	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,155	0,277	56,061	48,132	176,985	5
NBCAP-141	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,078	0,636	12,264	11,131	24,886	5
NBCAP-146	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,235	0,441	53,365	65,143	37,061	4,9
NBCAP-152	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,256	0,685	37,478	47,191	36,983	4,8
NBCAP-158	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,183	0,373	49,313	45,792	51,212	4,7
NBCAP-164	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,308	1	30,882	39,867	40,549	4,9
NBCAP-170	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,185	0,428	43,273	44,451	75,493	5,1
NBCAP-176	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,368	0,259	142,403	142,404	164,616	5,2
NBCAP-182	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,138	0,254	54,708	54,708	56,711	4,9
NBCAP-188	100 / 100 / 2 / 160 / 2,13	0,054	0,192	28,296	-	-	4,8

➤ GRUPO BCP:

Nº muestra	Dosificación Agua/Cemento/Bentonita/Porexpan	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	ESEC σ_c (MPa)	Elineal (MPa)	E50% σ_c (MPa)	γ_d (kN/m³)
BCP-1	300 / 600 / 7,2 / 2,71	2,061	0,784	262,867	298,336	293,098	10,2
BCP-2	300 / 600 / 7,2 / 2,71	2,187	0,71	308,034	321,254	284,156	9,8
BCP-3	300 / 600 / 7,2 / 2,71	1,880	0,466	403,367	352,346	434,085	10,1
BCP-6	300 / 450 / 6 / 3,75	0,554	0,379	146,193	171,614	251,818	7,3
BCP-12	300/600/6 / 3,75	0,936	1,172	79,869	170,806	153,854	8,6
BCP-13	300/600/6 / 3,75	0,889	0,333	267,078	280,557	306,070	8,3
BCP-17	220/403/4,4 / 3,75	1,337	0,385	347,223	364,833	431,572	7,4
BCP-18	220/403/4,4 / 3,75	0,866	0,306	283,111	250,420	288,179	7,2
BCP-21	220/403/4,4 / 3,75	2,358	0,365	646,142	690,812	736,875	7,5
BCP-22	220/403/4,4 / 3,75	1,941	0,4	485,153	-	-	7,7

A-1.2.2 Ensayo de compresión isotropa. Muestras BCAP

N° MUESTRA	γ (kN/m ³)	Emi (Mpa)	Emc (Mpa)	r (Emi/Emc)	Pci (Mpa)	ϵ_{volPci} (%)	k (Mpa)
BCAP-CI-VI	7,349	264,762	41,867	6,324	0,9	1,468	88,254
BCAP-CI-IX	6,886	509,091	21,000	24,242	0,8	0,900	169,697
BCAP-CI-XIV	7,554	120,896	25,714	4,701	1	2,356	7,994
BCAP-CI-XVII	7,611	425,000	49,157	8,646	1,6	0,971	141,667
BCAP-CI-XVIII	7,810	741,667	111,250	6,667	1,2	0,876	247,222
BCAP-CI-XXI	7,125	175,000	20,388	8,583	1,4	2,400	61,765
BCAP-CI-XXII	6,922	125,263	20,792	6,025	0,9	2,164	46,667
BCAP-CI-XXVI	5,689	174,500	126,909	1,375	1	2,149	58,167
BCAP-CI-XXIX	7,213	213,636	112,800	1,894	1,6	2,106	71,212
BCAP-CI-XXXIV	7,004	296,842	51,140	5,805	0,9	1,745	94,000
BCAP-CI-XXXVII	7,223	135,096	30,053	4,495	1,4	3,630	45,032
BCAP-CI-XXXVIII	7,295	155,889	34,220	4,556	1,2	2,545	51,963
BCAP-CI-42	7,355	178,558	19,801	9,017	1,8	3,352	58,167
BCAP-CI-46	7,005	223,393	29,307	7,622	1,6	2,978	74,731
BCAP-CI-50	7,126	158,889	58,367	2,722	0,9	1,699	57,778
BCAP-CI-49	6,987	102,941	11,290	9,118	0,7	2,079	23,333
BCAP-CI-54	7,111	715,000	42,059	17,000	0,9	1,238	43,333
BCAP-CI-57	7,075	132,188	31,685	4,172	1,6	3,489	48,958
BCAP-CI-58	7,295	151,800	43,444	3,494	1,6	3,348	51,111
BCAP-CI-60	5,440	82,941	14,242	5,824	0,4	1,574	31,333
BCAP-CI-64	5,247	100,727	8,428	11,952	0,5	1,451	28,854
BCAP-CI-66	5,400	27,549	6,077	4,533	0,9	9,203	9,183
BCAP-CI-70	5,787	68,718	8,272	8,308	0,8	3,694	22,906
BCAP-CI-71	5,845	61,045	7,900	7,727	0,7	3,920	20,348
BCAP-CI-72	5,518	121,724	5,763	21,121	0,4	1,105	40,928

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

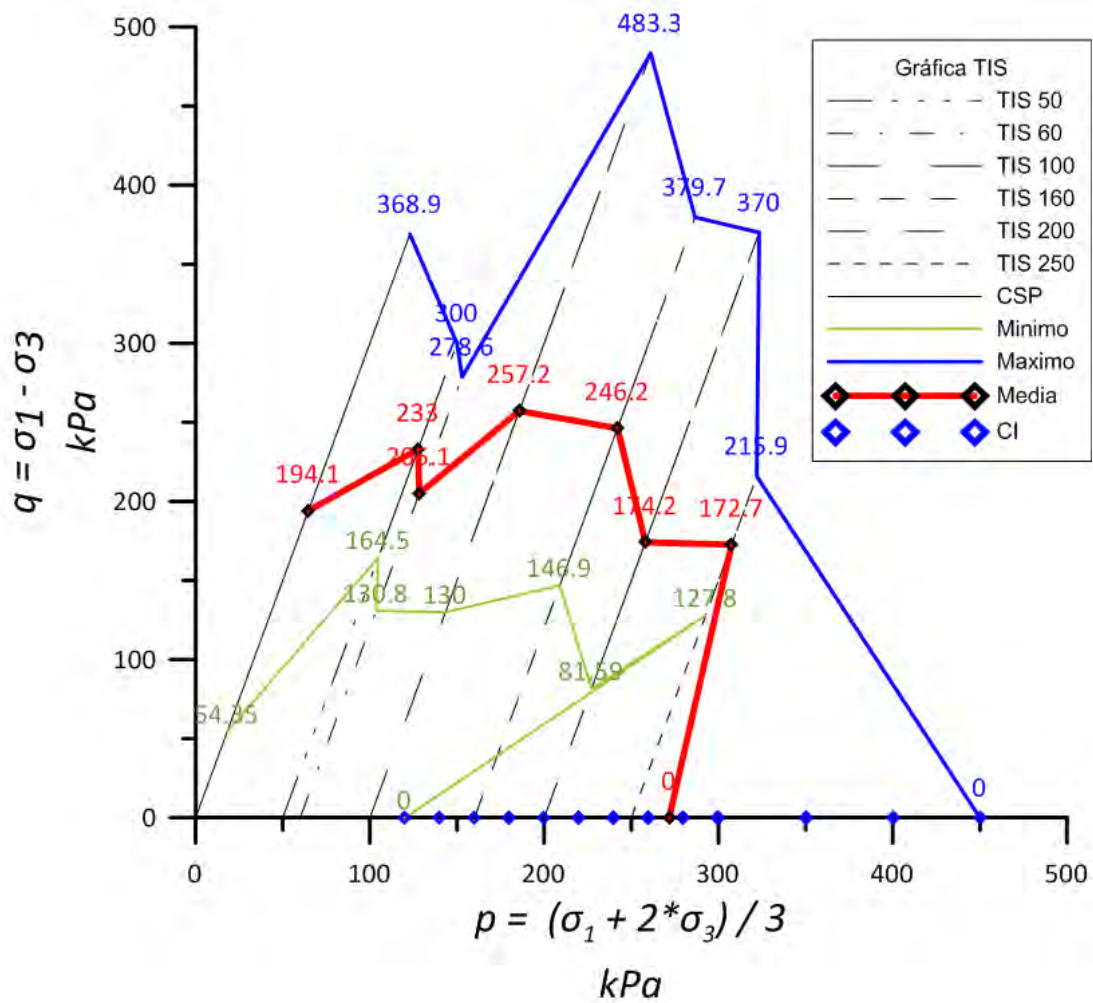
BCAP-CI-73	6,106	80,380	7,720	10,411	1	3,638	29,708
BCAP-CI-74	5,437	90,133	8,557	10,533	0,4	1,664	31,812
BCAP-CI-75	5,903	103,571	6,624	15,635	0,7	2,115	34,524
BCAP-CI-79	5,917	621,450	9,864	63,000	0,5	0,847	460,333
BCAP-CI-EX	5,073	53,427	2,156	24,784	0,18	1,763	20,919
BCAP-CI-82	5,410	62,455	10,651	5,864	0,4	1,900	18,694
BCAP-CI-83	6,033	152,471	9,781	15,588	0,8	1,785	43,200
BCAP-CI-EX2	5,263	40,257	3,860	10,429	0,28	1,959	5,105
BCAP-CI-85	5,829	66,050	29,685	2,225	0,3	1,681	22,017
BCAP-CI-86	5,778	81,758	5,034	16,242	0,7	3,269	28,550
BCAP-CI-87	5,921	40,406	9,042	4,469	0,5	2,552	13,469
BCAP-CI-91	5,527	45,667	9,133	5,000	0,26	1,818	15,222
BCAP-CI-94	5,751	33,099	10,988	3,012	0,7	5,511	10,723
BCAP-CI-95	5,536	58,125	6,118	9,500	0,3	1,613	19,375
BCAP-CI-100	5,589	54,440	3,945	13,800	0,18	1,014	18,147
BCAP-CI-102	5,413	82,320	10,163	8,100	0,14	0,634	22,867
BCAP-CI-103	5,618	57,000	3,644	15,643	0,12	0,648	16,889
BCAP-CI-104	5,484	22,742	3,705	6,139	0,12	1,319	7,135
BCAP-CI-105	5,848	37,735	3,019	12,500	0,2	1,707	12,578
BCAP-CI-106	5,646	41,785	1,860	22,462	0,26	5,169	12,933
BCAP-CI-107	5,848	32,050	2,962	10,821	0,2	1,895	10,957
BCAP-CI-108	5,316	46,367	2,552	18,167	0,18	1,531	15,456
BCAP-CI-110	5,520	68,500	10,538	6,500	0,24	0,854	22,833
BCAP-CI-113	5,547	352,500	38,108	9,250	0,5	0,468	104,444
BCAP-CI-114	5,655	120,435	20,368	5,913	0,5	1,538	40,145
NBCAP-CI-117	4,917	44,433	15,116	2,939	0,26	1,463	15,455
NBCAP-CI-119	4,932	27,705	5,948	4,658	0,12	1,299	9,235
NBCAP-CI-121	4,780	71,737	7,971	9,000	0,26	1,079	27,260

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

NBCAP-CI-132	4,881	48,889	5,973	8,185	0,18	1,227	13,895
NBCAP-CI-133	4,971	72,556	7,915	9,167	0,3	1,562	24,876
NBCAP-CI-136	4,740	48,176	11,767	4,094	0,12	0,637	15,826
NBCAP-CI-137	4,907	33,073	4,198	7,878	0,22	1,836	11,024
NBCAP-CI-144	4,658	55,200	5,111	10,800	0,18	0,957	14,919
NBCAP-CI-157	4,990	55,929	3,783	14,786	0,14	0,736	14,865
NBCAP-CI-162	4,848	34,194	4,732	7,226	0,16	1,653	9,513
NBCAP-CI-165	4,622	50,852	3,415	14,889	0,3	1,464	16,951
NBCAP-CI-166	4,755	30,525	4,983	6,126	0,35	3,356	10,175
NBCAP-CI-167	4,744	22,165	2,939	7,543	0,35	5,933	7,388
NBCAP-CI-168	4,815	60,000	3,099	19,364	0,35	1,386	20,000
NBCAP-CI-169	4,802	72,696	8,516	8,536	0,4	1,659	24,232
NBCAP-CI-171	4,876	66,050	10,110	6,533	0,3	1,158	22,017
NBCAP-CI-172	4,945	53,735	11,250	4,776	0,22	1,287	17,912
NBCAP-CI-173	5,089	43,000	3,583	12,000	0,26	3,000	14,333
NBCAP-CI-174	4,949	33,913	3,467	9,783	0,22	2,238	11,304
NBCAP-CI-175	5,036	35,945	11,281	3,186	0,3	2,671	11,694
NBCAP-CI-177	4,983	53,160	17,185	3,093	0,26	1,648	17,720
NBCAP-CI-178	5,000	37,029	8,526	4,343	0,3	2,384	12,343
NBCAP-CI-179	5,063	71,667	10,000	7,167	0,4	2,302	23,889
NBCAP-CI-180	4,896	54,913	8,316	6,603	0,45	2,078	18,304
NBCAP-CI-181	4,991	30,651	8,986	3,411	0,22	1,639	10,217
NBCAP-CI-183	4,871	25,151	2,766	9,094	0,3	3,623	8,384
NBCAP-CI-184	4,753	68,350	5,892	11,600	0,35	2,173	22,783
NBCAP-CI-185	4,720	20,523	2,052	10,000	0,2	2,024	6,841
NBCAP-CI-186	4,697	65,136	2,189	29,760	0,24	1,216	21,712
NBCAP-CI-187	4,769	31,718	4,110	7,718	0,3	2,760	10,573
NBCAP-CI-189	4,900	24,291	1,746	13,909	0,24	2,987	8,036

NBCAP-CI-190	4,844	40,151	1,668	24,075	0,26	2,188	12,091
NBCAP-CI-191	4,821	73,200	9,033	8,104	0,28	1,162	24,400
NBCAP-CI-192	4,757	91,333	2,556	35,733	0,28	1,182	24,685
NBCAP-CI-193	4,664	34,034	5,006	6,799	0,24	1,957	10,317

A-1.2.3 Gráfica resumen de los ensayos TIS. Valores máximos-mínimos y medios



A-1.3 PIROCLASTOS REALES

A-1.3.1 Resumen ensayos de compresión simple

Tabla 1: Resumen de los ensayos de compresión simple en las nuevas muestras. En esta tabla se muestran los pesos específicos y diferentes módulos de deformabilidad ($E_{SEC \sigma_C}$: Modulo de Young, E_{lineal} : pendiente de la porción recta de la curva y $E_{50\% \sigma_C}$: pendiente de la curva al 50% de la resistencia de pico).

Nº muestra	Tipo de piroclasto	σ_c (MPa)	ϵ_{rot} (%)	$E_{SEC \sigma_C}$ (MPa)	E_{lineal} (MPa)	$E_{50\% \sigma_C}$ (MPa)	γ_d (kN/m³)
5141-B	Cenizas	1,537	0,916	167,902	211,255	156,891	12,8
5141-G	Cenizas	0,963	1,008	95,627	103,088	91,028	11,2
3856-III	Tobas Cineríticas	1,668	0,847	196,942	207,087	201,401	11,3
3856-A	Tobas Cineríticas	2,705	0,703	384,912	535,212	343,424	13,1
3856-B	Tobas Cineríticas	0,684	1,291	53,043	72,125	62,423	10,2
5142-GRD	Lapillis	0,443	0,866	51,161	45,629	33,702	10,1
5142-I	Lapillis	0,332	0,931	35,718	46,777	28,803	10,2
5142-II	Lapillis	0,361	0,555	65,094	68,839	76,678	9,9
3857-C	Lapillis	0,555	1,192	46,622	77,259	94,858	8,9
5143-3	Lapillis	0,402	0,232	173,602	173,602	200,693	9,4
LPT-07-2	Lapillis	0,470	1,615	29,140	82,363	51,594	12,21
LPT-07-4	Lapillis	0,351	0,17	206,976	206,976	205,603	9,97
LPT-07 2DO GRP-1	Lapillis	1,623	0,891	182,220	239,024	216,475	10,7
LPT-07 2DO GRP-2	Lapillis	1,204	0,47	256,202	264,009	195,596	10,4
7066	Lapillis	0,160	2,573	6,235	10,432	6,222	9,8
7067	Lapillis	0,496	0,529	93,876	165,346	165,346	11,3
7068-1	Lapillis	0,189	0,453	41,867	43,045	28,109	9,7
7068-2	Lapillis	0,067	0,906	7,490	11,720	11,720	9,4
7069-1	Lapillis	0,660	0,689	95,831	107,320	81,334	9,4
7069-2	Lapillis	0,487	1,072	45,520	88,030	32,366	9,4
7071-II	Lapillis	0,451	0,79	57,089	80,305	73,888	8,3
7072-V	Lapillis	0,011	0,671	1,709	1,630	1,4540	10,5
7074-I	Lapillis	0,361	0,485	74,489	94,817	95,575	9,1
7075-II	Lapillis	0,185	0,384	48,317	57,867	50,089	8,9
7078-6	lapillis	1,160	0,657	176,668	176,668	150,695	11,6
7078-8	lapillis	1,016	0,775	131,218	152,772	121,793	11
6637-2	LPT-CSP	3,880	3,934	98,631	122,684	86,811	13,7
6637-4	LPT-CSP	4,720	4,93	95,748	107,774	70,907	13,2
6637-5	LPT-CSP	2,470	1,663	148,543	241,675	130,575	13,5
3825-B	Escorias	0,595	0,61	97,615	149,054	311,184	8

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

N° muestra	Tipo de piroclasto	σ_c (MPa)	ε_{rot} (%)	$E_{SEC} \sigma_C$ (MPa)	E_{lineal} (MPa)	$E_{50\% \sigma_c}$ (MPa)	γ_d (kN/m³)
3825-C	Escorias	0,350	5,817	6,031			7,5
6635-A	Pómez Tobaceas	1,1941	1,003	119,057	164,992	139,763	12,1
6635-B	Pomez Tobaceas	0,942	0,815	115,657	168,013	147,171	9,3
6635-C	Pomez Tobaceas	0,9108	1,388	65,622	94,317	77,031	9,8
6633-XI	Pomez Tobaceas	2,101	0,959	219,069	347,468	228,355	9,8
6633-XII	Pomez Tobaceas	1,618	0,927	174,551	212,374	127,771	10,4
6633-XIII	Pomez Tobaceas	1,910	0,769	248,416	266,147	162,147	10,2
6633-XIV	Pomez Tobaceas	1,422	0,821	173,281	212,855	156,252	9,1
6634-A	Pomez	0,099	2,393	4,127	9,594	7,440	5,1
6638-I	Pomez	0,160	1,263	12,641	18,579	14,710	5,6
7079-V	Lapillis alerados	0,103	1,08	9,543	9,543	9,285	13
7076-4	Lapillis alerados	1,080	0,883	122,365	137,886	122,133	12
7077-5	Lapillis alerados	1,367	1,053	129,814	163,402	139,972	12,6
7077-6	Lapillis alerados	1,082	0,587	184,354	225,397	158,124	11,7
7080-I	Lapillis alerados	1,040	1,464	71,037	108,236	72,542	9,8
7080-II	Lapillis alerados	1,063	1,585	67,124	96,661	77,954	10,5
7080-III	Lapillis alerados	0,862	1,625	53,040	69,174	61,788	10,9
7076-2(2)	Lapillis alerados	0,684	1,234	55,462			12,1
7076-3(2)	Lapillis alerados	0,600	0,882	68,083	88,884	52,955	11,85

A-1.3.2 Resumen ensayos de compresión isotropa

Tabla 2: Resultados de los ensayos Triaxiales CI.

N° MUESTRA	γ (kN/m ³)	E_{mi} (Mpa)	E_{mc} (Mpa)	r (E_{mi}/E_{mc})	P_{ci} (Mpa)	ε_{volPci} (%)	k (Mpa)
3857A	9,642	314,314	27,026	11,630	1,632	2,863	104,771
5143B	9,788	297,141	27,901	10,650	0,880	2,644	99,047
3825A	8,750	140,784	26,146	5,385	1,428	3,697	45,603
6634-I	5,200	23,793	6,853	3,472	0,184	2,443	7,717
6634-II	5,178	28,552	8,923	3,200	0,061	0,493	9,517
6634-II	5,178	17,131	3,911	4,380	0,143	2,250	5,710
6634-III	5,050	60,110	6,207	9,684	0,143	0,750	20,037
6634-IV	4,678	32,738	0,615	53,263	0,071	0,511	10,913
6638-III	5,693	42,148	10,900	3,867	0,204	1,316	14,049
6638 2do grupo(2)	5,410	19,851	12,279	1,617	0,122	1,479	6,617
6638 2do grupo(4)	5,542	20,123	7,496	2,684	0,306	4,196	6,422
7068-II	9,677	177,846	36,462	4,878	1,632	3,980	59,282
LPT-07 2do grupo3	10,971	356,902	93,105	3,833	2,039	3,236	118,967
7069-I	8,640	286,615	48,885	5,863	1,428	2,573	95,538
7069-II	9,391	209,353	35,536	5,891	1,428	2,764	69,784
7071-I	9,601	224,030	50,791	4,411	1,428	2,110	74,677
7072-I	10,622	456,963	101,052	4,522	1,835	1,569	152,321
7072-II	11,100	462,808	127,986	3,616	1,428	1,147	154,269
7073-III	5,699	45,887	11,415	4,020	0,204	1,380	15,296
7073-IV	5,564	15,531	3,669	4,234	0,204	3,742	5,177
7074-VI	8,708	64,468	23,388	2,756	1,020	6,091	21,489
7075-IV	8,951	62,366	19,633	3,177	0,408	2,080	20,789
7067-I	9,795	316,114	68,887	4,589	1,224	1,761	105,371
7078-IV	10,864	235,834	23,371	10,091	1,835	2,288	78,611
7078-V	10,306	37,383	9,984	3,744	1,632	7,274	11,257
7078-VII	10,322	118,334	31,453	3,762	1,020	3,112	39,730

A-1.3.3 Resumen ensayos triaxial TIS

Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $\frac{(\sigma_1 + 2 * \sigma_3)}{3}$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γs	n (γs-γd)/γs
5141-A	1,50	4,60	5,03	9,60	6,70	12,09	27,86	0,57
5141-C	1,00	2,90	3,47	7,00	4,83	11,10	27,86	0,60
5141-D	1,20	3,20	3,07	6,20	4,07	11,01	27,86	0,60
5141-E	1,20	3,70	2,23	5,00	2,67	12,56	27,86	0,55
5141-F	1,00	2,30	1,27	2,50	1,33	11,13	27,86	0,60
3856-I	1,50	5,80	5,43	9,30	6,60	10,80	-	-
3856-II	1,00	5,70	2,90	4,40	2,47	12,23	25,00	-
3855-A	0,83	1,18	0,49	-	-	9,25	25,00	0,63
3855-B	1,16	1,25	0,62	-	-	9,45	25,00	0,62
3855-C	1,16	1,78	0,99	-	-	9,62	25,00	0,62
3855-D	0,99	1,55	1,12	-	-	9,14	25,00	0,63
3855-E	1,16	1,68	1,36	-	-	9,31	25,00	0,63
3855-F	0,15	0,62	3,71	8,65	6,38	8,53	25,00	0,66
4386-I	0,16	1,28	3,93	7,86	6,12	9,75	26,00	0,63
4386-II	0,16	1,81	4,10	7,81	6,10	11,18	26,00	0,57
4386-III	0,31	1,92	2,64	5,06	3,69	11,48	26,00	0,56
4386-IV	0,78	2,48	1,83	3,23	2,08	10,93	26,00	0,58
4386-V	1,25	2,29	1,26	1,71	1,07	12,27	26,00	0,53
4386-I-2BLQ	0,95	1,07	3,86	8,80	6,43	8,59	26,00	0,67
4386-II-2BLQ	0,16	1,65	4,05	8,00	6,17	11,48	26,00	0,56
4386-III-2BLQ	0,16	1,02	2,34	5,60	3,87	10,92	26,00	0,58
4386-IV-2BLQ	0,16	1,29	1,43	4,60	2,53	12,27	26,00	0,53
4386-V-BLQ	0,16	1,23	1,41	3,30	2,10	12,27	26,00	0,53
5142-C	-	-	-	-	-	9,71	-	-
5142-A	-	-	-	5,00	3,47	10,35	-	-
3857-A	-	-	-	7,20	5,90	9,64	28,70	0,66
3857-B	0,50	0,60	1,20	2,50	1,83	8,51	28,70	0,70
6632-I	0,70	0,96	0,52	1,54	0,71	9,78	26,09	0,63
6631-I	0,50	0,20	0,47	1,83	1,01	9,02	25,74	0,65
6631-II	0,50	0,30	0,70	3,25	1,68	9,45	25,74	0,63
LPT-07-1	0,50	0,90	0,90	3,09	1,63	9,43	-	-
LPT-07-3	-	-	-	8,10	6,20	10,87	-	-
3876-C	1,40	3,40	2,13	-	-	13,92	30,90	0,55
3876-B	3,12	2,60	2,37	-	-	13,40	30,90	0,57

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $(\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γ_s	n ($\gamma_s - \gamma_d$)/ γ_s
4193	1,00	7,80	4,10	-	-	16,60	29,60	0,44
4188	0,80	7,00	4,83	-	-	16,40	25,60	0,36
4191	-	-	-	-	-	18,90	29,80	0,37
7067-II	0,36	0,51	0,97	-	-	9,81	30,79	0,68
7068-4	1,85	1,30	1,03	2,73	1,51	9,83	27,72	0,65
7068-3	2,00	0,90	1,30	2,78	1,93	9,50	27,72	0,66
7070-I	0,64	0,12	0,44	1,04	0,75	10,05	27,01	0,63
7070-II	0,40	0,22	0,87	1,80	1,40	7,80	27,01	0,71
7070-III	0,66	0,19	0,16	1,47	0,59	7,13	27,01	0,74
7070-IV	0,41	0,22	0,12	0,80	0,32	7,00	27,01	0,74
LPT-07-02GRP2	0,60	1,43	2,28	5,71	3,70	11,32	-	-
7073-III	-	-	-	1,19	1,30	5,70	27,98	0,80
7073-III	1,40	0,18	0,26	0,76	0,45	5,37	27,98	0,81
7073-V	0,88	0,18	0,16	1,01	0,44	5,83	27,98	0,79
7073-VI	1,04	0,16	0,15	0,51	0,27	5,65	27,98	0,80
7074-III	-	-	-	4,76	3,39	9,50	29,31	0,68
7074-IV	1,36	0,72	0,74	1,63	1,04	9,33	29,31	0,68
7074-III	0,34	0,86	0,49	1,69	0,76	9,55	29,31	0,67
7074-V (PEQ)	1,00	0,64	0,31	0,93	0,41	9,70	29,31	0,67
7071-I	-	-	-	6,60	5,70	9,60	29,02	0,67
7071-III	1,56	0,28	0,19	1,30	0,53	8,89	29,02	0,69
7075-I	0,38	0,18	0,14	0,77	0,34	8,95	30,70	0,71
7075-III	0,88	0,26	0,29	1,17	0,59	8,58	30,70	0,72
7072-I	-	-	-	8,32	6,27	10,62	27,46	0,61
7072-III	0,30	1,40	1,07	3,73	1,84	10,71	27,46	0,61
7072-IV	0,26	1,33	1,24	3,80	2,07	10,93	27,46	0,60
7072-III	-	-	-	8,91	6,47	11,10	27,46	0,60
7078-IV	-	-	-	6,22	4,67	10,86	30,24	0,64
7078-V	-	-	-	6,44	5,05	10,31	30,24	0,66
7078-IV	0,60	1,15	0,78	2,32	1,17	10,52	30,24	0,65
7078-II	0,33	0,55	1,18	3,22	2,07	10,58	30,24	0,65
7078-III	0,34	1,00	0,93	2,56	1,45	10,40	30,24	0,66
7078-VII	-	-	-	4,31	2,94	10,32	30,24	0,66
7079-VII	1,07	0,64	2,51	6,14	4,35	14,16	29,08	0,51
7079-II	0,04	0,17	1,56	4,85	3,12	13,49	29,08	0,54
7079-IV	0,31	0,57	3,69	7,73	6,08	12,28	29,08	0,58
7066-I	2,60	2,84	4,45	9,18	6,56	11,90	29,60	0,60
7066-II	1,65	2,36	3,39	9,24	5,68	11,66	29,60	0,61

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $(\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γs	n (γs-γd)/γs
7066-III	1,95	1,50	2,50	6,84	4,28	11,18	29,60	0,62
7066-IV	2,45	3,20	2,57	6,35	3,62	11,89	29,60	0,60
7066-V	1,17	1,49	1,50	6,25	3,08	11,88	29,60	0,60
7077-I	2,10	3,50	4,67	10,79	7,10	13,18	27,41	0,52
7077-II	1,34	2,75	3,52	7,18	4,99	12,18	27,41	0,56
7077-III	1,04	1,70	1,57	4,28	2,43	13,08	27,41	0,52
7077-IV	2,54	3,50	2,67	5,44	3,31	12,69	27,41	0,54
7076-II	1,33	4,74	5,08	10,48	6,99	12,13	27,30	0,56
7076-II	1,53	3,03	3,61	7,90	5,23	11,88	27,30	0,56
7076-III	1,28	4,66	3,05	6,27	3,59	12,48	27,30	0,54
7076-V	1,76	2,83	1,94	4,50	2,50	11,77	27,30	0,57
7076-2GRP-I	1,33	5,14	4,31	8,87	5,56	12,29	27,30	0,55
7080-V	2,42	4,01	4,84	8,41	6,30	10,32	27,21	0,62
7080-6	1,38	3,15	3,45	6,38	4,53	9,89	27,21	0,64
7080-7	2,09	2,84	2,45	5,07	3,19	10,44	27,21	0,62
7080-9	1,39	3,42	3,74	5,82	4,54	10,26	27,21	0,62
7080-8	1,61	2,53	1,84	4,72	2,57	10,78	27,21	0,60
7080-10	1,61	2,70	2,90	6,06	4,02	11,63	27,21	0,57
6637-I	4,20	12,60	7,70	9,20	6,57	13,30	25,12	0,47
3825-A	0,50	0,70	3,73	6,00	5,50	8,75	-	-
6635-1	2,50	5,20	5,23	9,80	6,77	8,87	24,27	0,63
6635-2	3,00	3,10	2,53	3,80	2,77	10,08	24,27	0,58
6636-1	3,50	4,90	4,63	-	-	11,06	24,04	0,54
6636-2	3,50	3,50	3,67	6,00	4,50	9,77	24,04	0,59
6633-I	2,50	3,10	4,53	6,30	5,60	9,29	23,82	0,61
6633-II	2,00	2,50	4,33	7,20	5,90	9,10	23,82	0,62
6633-III	2,50	3,50	4,67	7,40	5,97	9,06	23,82	0,62
6633-IV	1,80	3,70	2,23	4,80	2,60	9,30	23,82	0,61
6633-V	2,00	3,30	2,10	4,30	2,43	9,08	23,82	0,62
6633-VI	2,00	3,40	2,63	5,00	3,17	8,93	23,82	0,63
6633-VII	2,00	3,60	2,70	5,30	3,27	9,09	23,82	0,62
6633-VIII	2,00	3,30	3,60	6,20	4,57	9,40	23,82	0,61
6633-IX	2,00	4,10	3,87	6,80	4,77	9,90	23,82	0,58
6634-I	-	-	-	0,52	0,47	5,20	23,66	0,78
6634-III	-	-	-	0,32	0,27	5,05	23,66	0,79
6634-IV	0,50	0,08	0,13	0,16	0,15	4,68	23,66	0,80
6638-III	0,50	0,40	0,43	0,58	0,49	6,92	22,62	0,69
6638-II	2,20	0,13	0,14	0,28	0,19	5,30	22,62	0,77

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $(\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γs	n (γs-γd)/γs
6638-IV	0,90	0,08	0,23	0,41	0,34	5,74	22,62	0,75
6638-V	1,00	0,12	0,30	0,54	0,44	5,83	22,62	0,74
6638-VI	0,44	0,07	0,22	0,39	0,33	5,32	22,62	0,76
6638-2dogrp-III	-	-	-	0,83	0,54	5,77	22,62	0,74
6638-2dogrp-IV	-	-	-	1,43	0,98	5,54	22,62	0,76
6638-2dogrp-V	1,40	0,15	0,11	0,49	0,22	5,70	22,62	0,75
3573-II	0,08	0,26	0,19	-	-	4,95	24,60	0,80
3762-A1	0,72	0,40	0,23	-	-	5,26	24,20	0,78
3762-A2	0,73	0,22	0,32	-	--	5,10	24,20	0,79
5141-A	1,50	4,60	5,03	9,60	6,70	12,09	27,86	0,57
5141-C	1,00	2,90	3,47	7,00	4,83	11,10	27,86	0,60
5141-D	1,20	3,20	3,07	6,20	4,07	11,01	27,86	0,60
5141-E	1,20	3,70	2,23	5,00	2,67	12,56	27,86	0,55
5141-F	1,00	2,30	1,27	2,50	1,33	11,13	27,86	0,60
3856-I	1,50	5,80	5,43	9,30	6,60	10,80	-	-
3856-II	1,00	5,70	2,90	4,40	2,47	12,23	25,00	-
3855-A	0,83	1,18	0,49	-	-	9,25	25,00	0,63
3855-B	1,16	1,25	0,62	-	-	9,45	25,00	0,62
3855-C	1,16	1,78	0,99	-	-	9,62	25,00	0,62
3855-D	0,99	1,55	1,12	-	-	9,14	25,00	0,63
3855-E	1,16	1,68	1,36	-	-	9,31	25,00	0,63
3855-F	0,15	0,62	3,71	8,65	6,38	8,53	25,00	0,66
4386-I	0,16	1,28	3,93	7,86	6,12	9,75	26,00	0,63
4386-II	0,16	1,81	4,10	7,81	6,10	11,18	26,00	0,57
4386-III	0,31	1,92	2,64	5,06	3,69	11,48	26,00	0,56
4386-IV	0,78	2,48	1,83	3,23	2,08	10,93	26,00	0,58
4386-V	1,25	2,29	1,26	1,71	1,07	12,27	26,00	0,53
4386-I-2BLQ	0,95	1,07	3,86	8,80	6,43	8,59	26,00	0,67
4386-II-2BLQ	0,16	1,65	4,05	8,00	6,17	11,48	26,00	0,56
4386-III-2BLQ	0,16	1,02	2,34	5,60	3,87	10,92	26,00	0,58
4386-IV-2BLQ	0,16	1,29	1,43	4,60	2,53	12,27	26,00	0,53
4386-V-BLQ	0,16	1,23	1,41	3,30	2,10	12,27	26,00	0,53
5142-C	-	-	-	-	-	9,71	-	-
5142-A	-	-	-	5,00	3,47	10,35	-	-
3857-A	-	-	-	7,20	5,90	9,64	28,70	0,66
3857-B	0,50	0,60	1,20	2,50	1,83	8,51	28,70	0,70
6632-I	0,70	0,96	0,52	1,54	0,71	9,78	26,09	0,63
6631-I	0,50	0,20	0,47	1,83	1,01	9,02	25,74	0,65
6631-II	0,50	0,30	0,70	3,25	1,68	9,45	25,74	0,63
LPT-07-1	0,50	0,90	0,90	3,09	1,63	9,43	-	-

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $(\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γs	n (γs-γd)/γs
LPT-07-3	-	-	-	8,10	6,20	10,87	-	-
3876-C	1,40	3,40	2,13	-	-	13,92	30,90	0,55
3876-B	3,12	2,60	2,37	-	-	13,40	30,90	0,57
4193	1,00	7,80	4,10	-	-	16,60	29,60	0,44
4188	0,80	7,00	4,83	-	-	16,40	25,60	0,36
4191	-	-	-	-	-	18,90	29,80	0,37
7067-II	0,36	0,51	0,97	-	-	9,81	30,79	0,68
7068-4	1,85	1,30	1,03	2,73	1,51	9,83	27,72	0,65
7068-3	2,00	0,90	1,30	2,78	1,93	9,50	27,72	0,66
7070-I	0,64	0,12	0,44	1,04	0,75	10,05	27,01	0,63
7070-II	0,40	0,22	0,87	1,80	1,40	7,80	27,01	0,71
7070-III	0,66	0,19	0,16	1,47	0,59	7,13	27,01	0,74
7070-IV	0,41	0,22	0,12	0,80	0,32	7,00	27,01	0,74
LPT-07-02GRP2	0,60	1,43	2,28	5,71	3,70	11,32	-	-
7073-III	-	-	-	1,19	1,30	5,70	27,98	0,80
7073-III	1,40	0,18	0,26	0,76	0,45	5,37	27,98	0,81
7073-V	0,88	0,18	0,16	1,01	0,44	5,83	27,98	0,79
7073-VI	1,04	0,16	0,15	0,51	0,27	5,65	27,98	0,80
7074-III	-	-	-	4,76	3,39	9,50	29,31	0,68
7074-IV	1,36	0,72	0,74	1,63	1,04	9,33	29,31	0,68
7074-III	0,34	0,86	0,49	1,69	0,76	9,55	29,31	0,67
7074-V (PEQ)	1,00	0,64	0,31	0,93	0,41	9,70	29,31	0,67
7071-I	-	-	-	6,60	5,70	9,60	29,02	0,67
7071-III	1,56	0,28	0,19	1,30	0,53	8,89	29,02	0,69
7075-I	0,38	0,18	0,14	0,77	0,34	8,95	30,70	0,71
7075-III	0,88	0,26	0,29	1,17	0,59	8,58	30,70	0,72
7072-I	-	-	-	8,32	6,27	10,62	27,46	0,61
7072-III	0,30	1,40	1,07	3,73	1,84	10,71	27,46	0,61
7072-IV	0,26	1,33	1,24	3,80	2,07	10,93	27,46	0,60
7072-III	-	-	-	8,91	6,47	11,10	27,46	0,60
7078-IV	-	-	-	6,22	4,67	10,86	30,24	0,64
7078-V	-	-	-	6,44	5,05	10,31	30,24	0,66
7078-IV	0,60	1,15	0,78	2,32	1,17	10,52	30,24	0,65
7078-II	0,33	0,55	1,18	3,22	2,07	10,58	30,24	0,65
7078-III	0,34	1,00	0,93	2,56	1,45	10,40	30,24	0,66
7078-VII	-	-	-	4,31	2,94	10,32	30,24	0,66
7079-VII	1,07	0,64	2,51	6,14	4,35	14,16	29,08	0,51
7079-II	0,04	0,17	1,56	4,85	3,12	13,49	29,08	0,54
7079-IV	0,31	0,57	3,69	7,73	6,08	12,28	29,08	0,58
7066-I	2,60	2,84	4,45	9,18	6,56	11,90	29,60	0,60
7066-II	1,65	2,36	3,39	9,24	5,68	11,66	29,60	0,61
7066-III	1,95	1,50	2,50	6,84	4,28	11,18	29,60	0,62
7066-IV	2,45	3,20	2,57	6,35	3,62	11,89	29,60	0,60
7066-V	1,17	1,49	1,50	6,25	3,08	11,88	29,60	0,60
7077-I	2,10	3,50	4,67	10,79	7,10	13,18	27,41	0,52

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

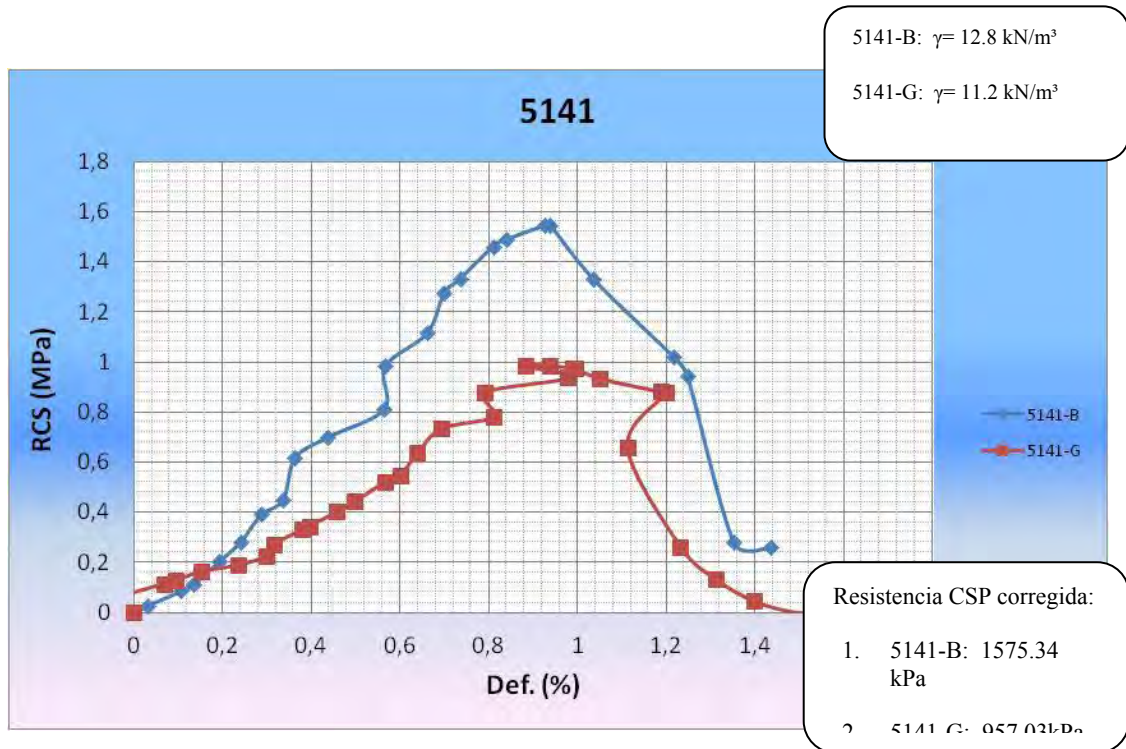
Nº Muestra	Deformación (%)	q $\sigma_1 - \sigma_3$	P $(\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3$	q a altas def. (30%)	p (altas defr.)	γ (kN/m³)	γ_s	n ($\gamma_s - \gamma_d$)/ γ_s
7077-II	1,34	2,75	3,52	7,18	4,99	12,18	27,41	0,56
7077-III	1,04	1,70	1,57	4,28	2,43	13,08	27,41	0,52
7077-IV	2,54	3,50	2,67	5,44	3,31	12,69	27,41	0,54
7076-II	1,33	4,74	5,08	10,48	6,99	12,13	27,30	0,56
7076-II	1,53	3,03	3,61	7,90	5,23	11,88	27,30	0,56
7076-III	1,28	4,66	3,05	6,27	3,59	12,48	27,30	0,54
7076-V	1,76	2,83	1,94	4,50	2,50	11,77	27,30	0,57
7076-2GRP-I	1,33	5,14	4,31	8,87	5,56	12,29	27,30	0,55
7080-V	2,42	4,01	4,84	8,41	6,30	10,32	27,21	0,62
7080-6	1,38	3,15	3,45	6,38	4,53	9,89	27,21	0,64
7080-7	2,09	2,84	2,45	5,07	3,19	10,44	27,21	0,62
7080-9	1,39	3,42	3,74	5,82	4,54	10,26	27,21	0,62
7080-8	1,61	2,53	1,84	4,72	2,57	10,78	27,21	0,60
7080-10	1,61	2,70	2,90	6,06	4,02	11,63	27,21	0,57
6637-I	4,20	12,60	7,70	9,20	6,57	13,30	25,12	0,47
3825-A	0,50	0,70	3,73	6,00	5,50	8,75	-	-
6635-1	2,50	5,20	5,23	9,80	6,77	8,87	24,27	0,63
6635-2	3,00	3,10	2,53	3,80	2,77	10,08	24,27	0,58
6636-1	3,50	4,90	4,63	-	-	11,06	24,04	0,54
6636-2	3,50	3,50	3,67	6,00	4,50	9,77	24,04	0,59
6633-I	2,50	3,10	4,53	6,30	5,60	9,29	23,82	0,61
6633-II	2,00	2,50	4,33	7,20	5,90	9,10	23,82	0,62
6633-III	2,50	3,50	4,67	7,40	5,97	9,06	23,82	0,62
6633-IV	1,80	3,70	2,23	4,80	2,60	9,30	23,82	0,61
6633-V	2,00	3,30	2,10	4,30	2,43	9,08	23,82	0,62
6633-VI	2,00	3,40	2,63	5,00	3,17	8,93	23,82	0,63
6633-VII	2,00	3,60	2,70	5,30	3,27	9,09	23,82	0,62
6633-VIII	2,00	3,30	3,60	6,20	4,57	9,40	23,82	0,61
6633-IX	2,00	4,10	3,87	6,80	4,77	9,90	23,82	0,58
6634-I	-	-	-	0,52	0,47	5,20	23,66	0,78
6634-III	-	-	-	0,32	0,27	5,05	23,66	0,79
6634-IV	0,50	0,08	0,13	0,16	0,15	4,68	23,66	0,80
6638-III	0,50	0,40	0,43	0,58	0,49	6,92	22,62	0,69
6638-II	2,20	0,13	0,14	0,28	0,19	5,30	22,62	0,77
6638-IV	0,90	0,08	0,23	0,41	0,34	5,74	22,62	0,75
6638-V	1,00	0,12	0,30	0,54	0,44	5,83	22,62	0,74
6638-VI	0,44	0,07	0,22	0,39	0,33	5,32	22,62	0,76
6638-2dogrp-III	-	-	-	0,83	0,54	5,77	22,62	0,74
6638-2dogrp-IV	-	-	-	1,43	0,98	5,54	22,62	0,76
6638-2dogrp-V	1,40	0,15	0,11	0,49	0,22	5,70	22,62	0,75
3573-II	0,08	0,26	0,19	-	-	4,95	24,60	0,80
3762-A1	0,72	0,40	0,23	-	-	5,26	24,20	0,78
3762-A2	0,73	0,22	0,32	-	-	5,10	24,20	0,79

A-1.3.4 Ensayos de laboratorio. Informe completo

A-1.3.4.1 Cenizas. M-5141



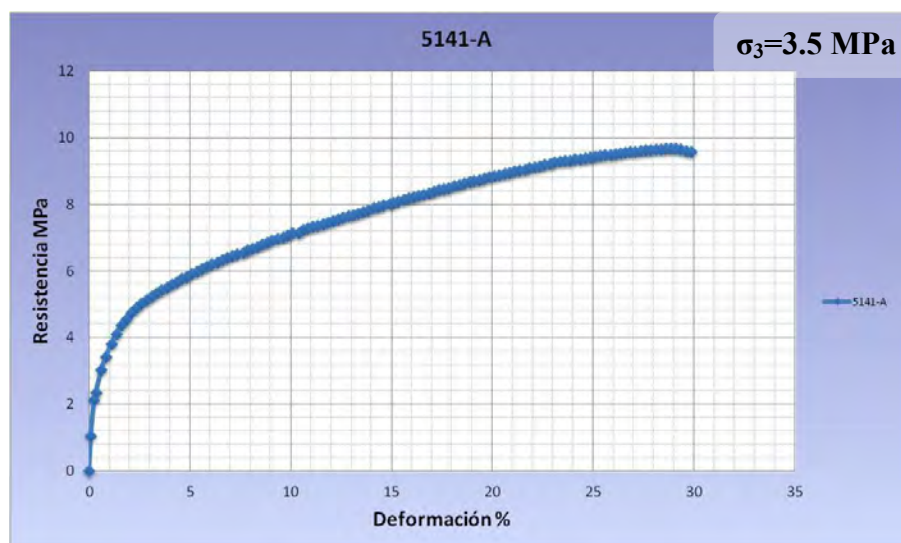
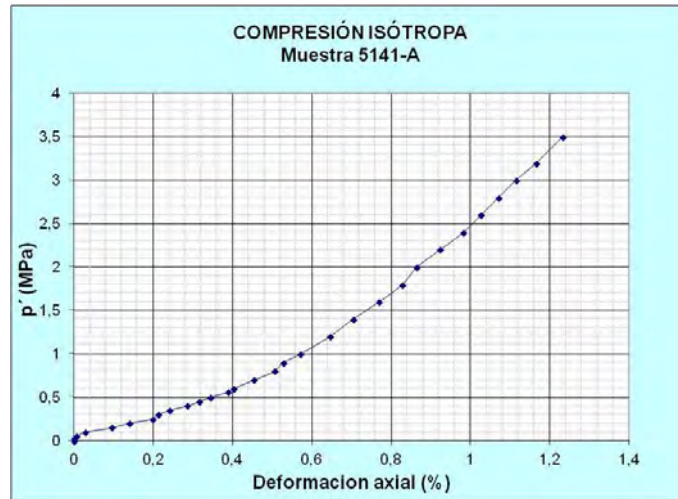
A-1.3.4.1.1 ENSAYO CSP.



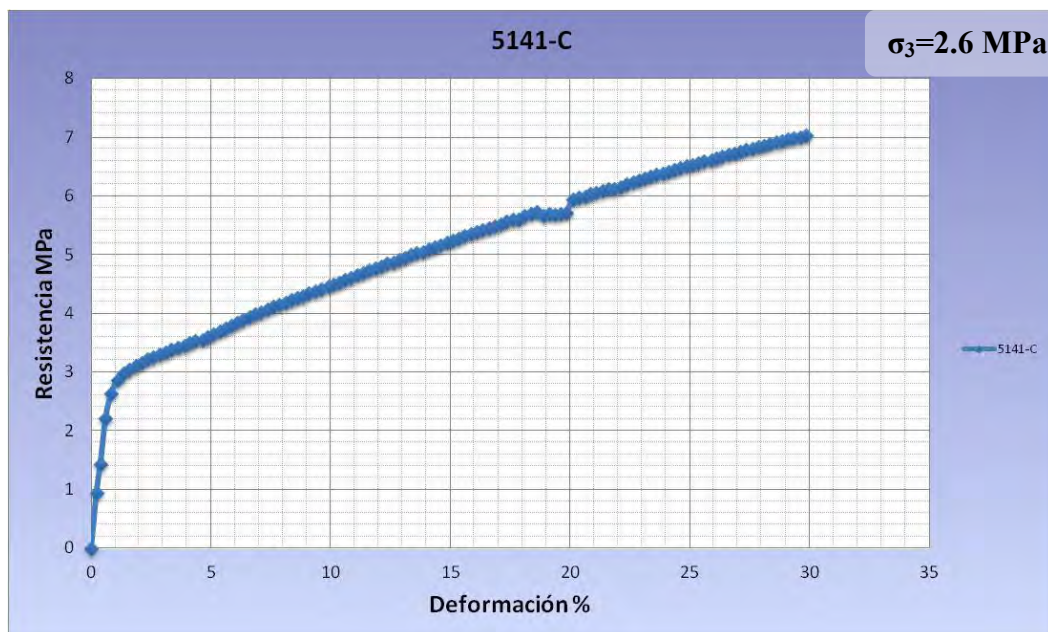
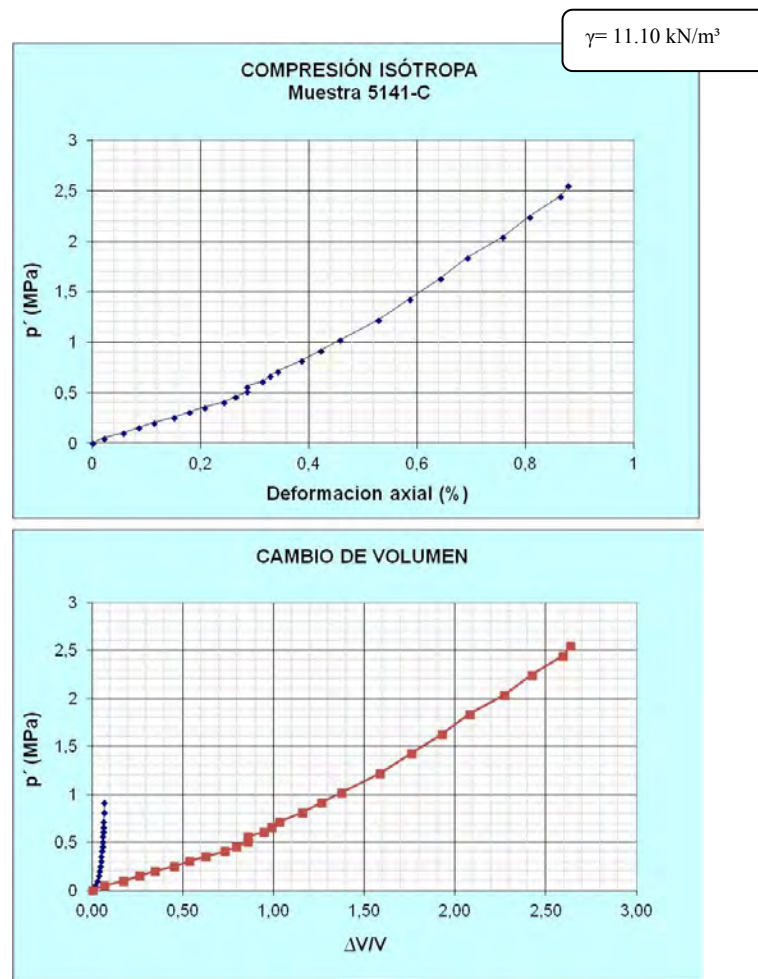
A-1.3.4.1.2 ENSAYO CI+TIS:

A-1.3.4.1.2.1 Muestra 5141-A.

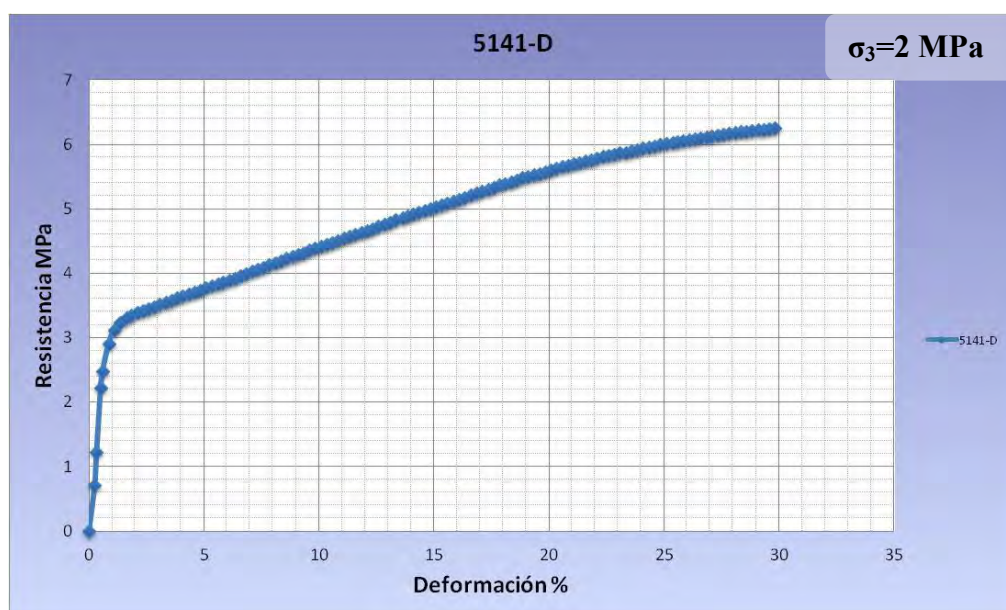
$$\gamma = 12.09 \text{ kN/m}^3$$



A-1.3.4.1.2.2 Muestra 5141-C.

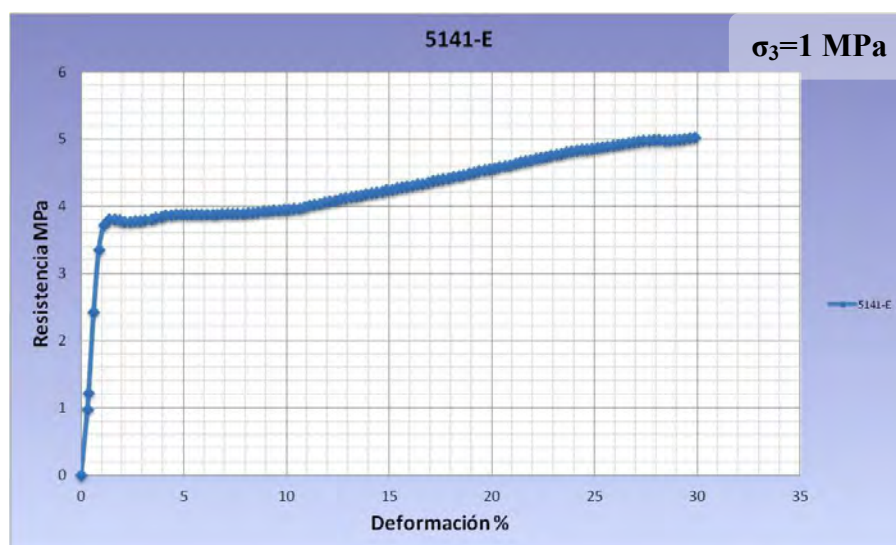
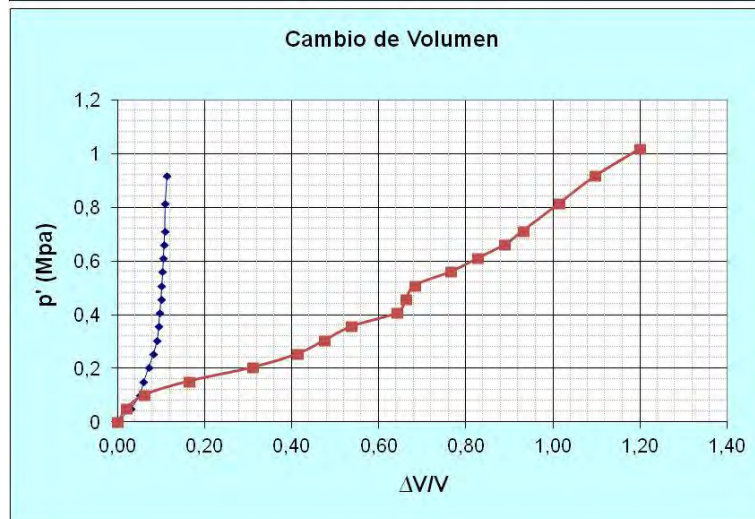
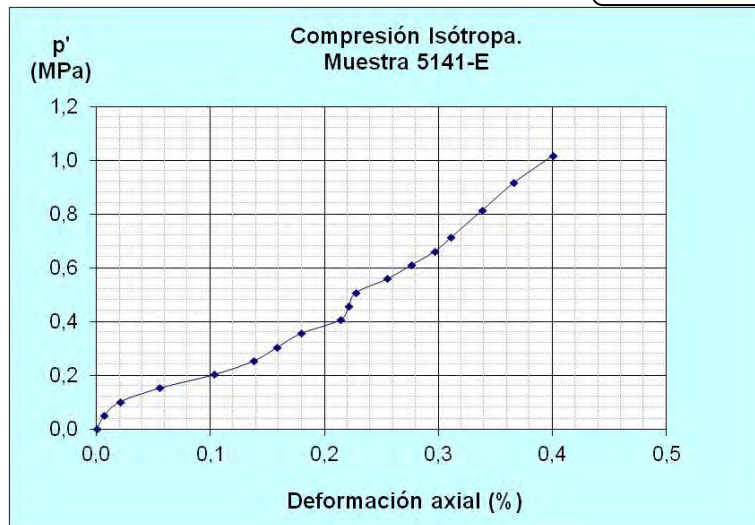


A-1.3.4.1.2.3 Muestra 5141-D.



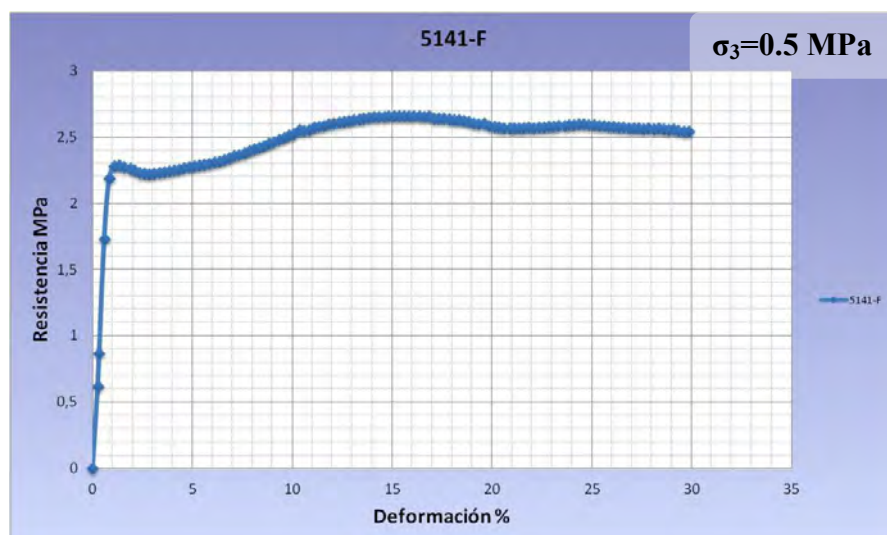
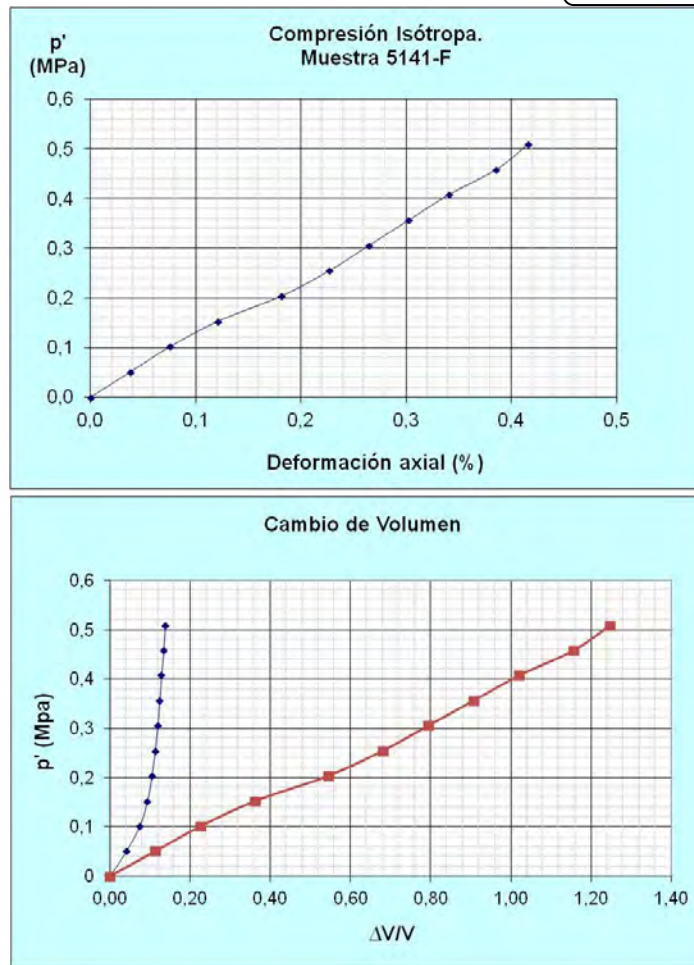
A-1.3.4.1.2.4 Muestra 5141-E.

$$\gamma = 12.56 \text{ kN/m}^3$$



A-1.3.4.1.2.5 Muestra 5141-F.

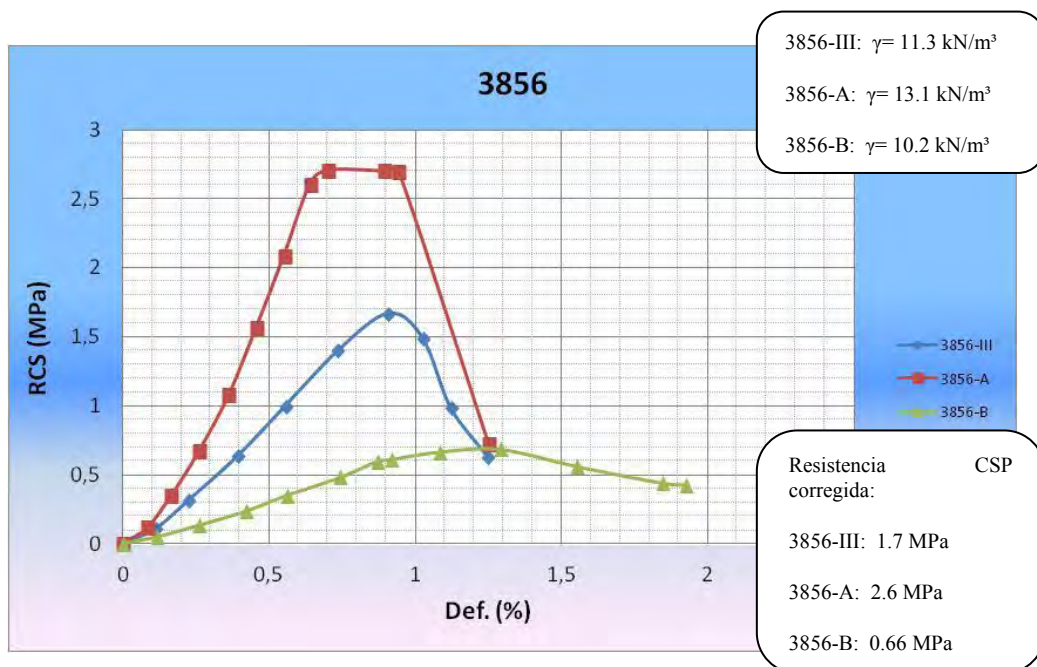
$$\gamma = 11.13 \text{ kN/m}^3$$



A-1.3.4.2 CST-P-3856.



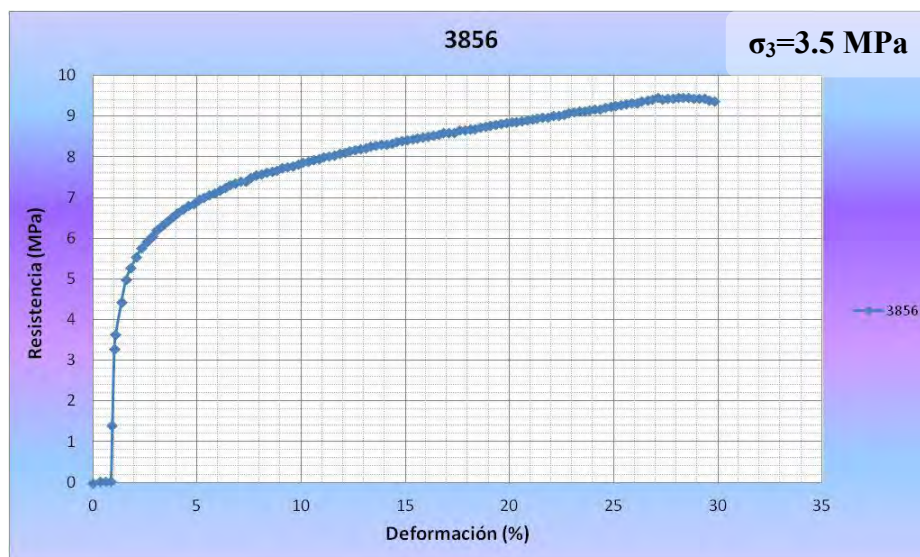
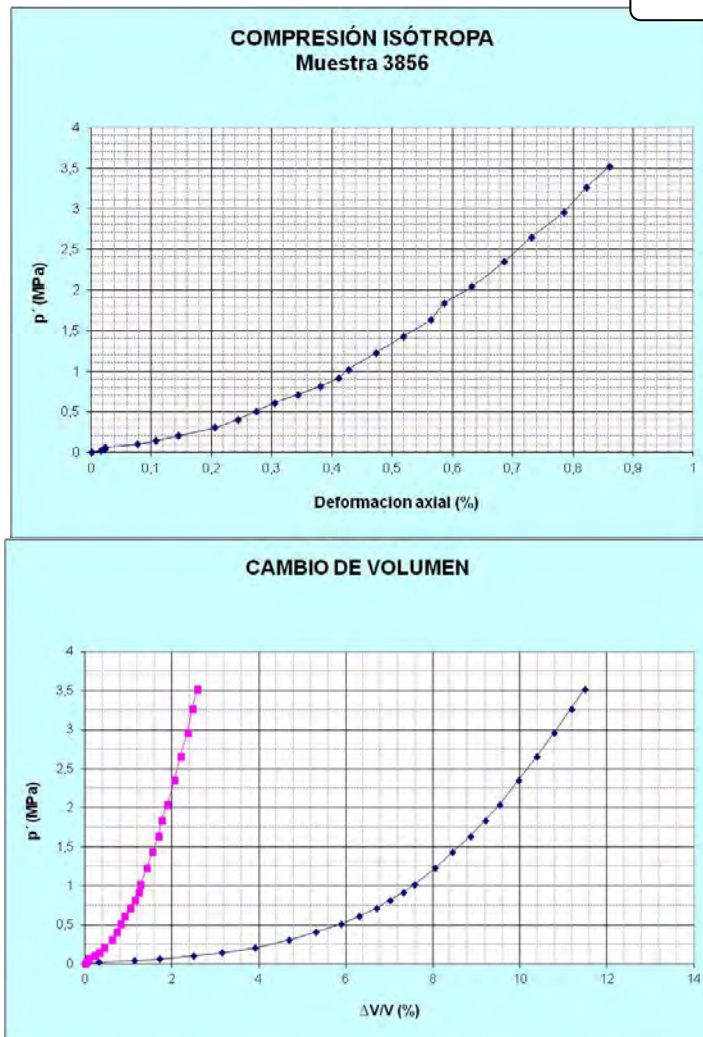
A-1.3.4.2.1 ENSAYO CSP.



A-1.3.4.2.2 ENSAYO CI + TIS:

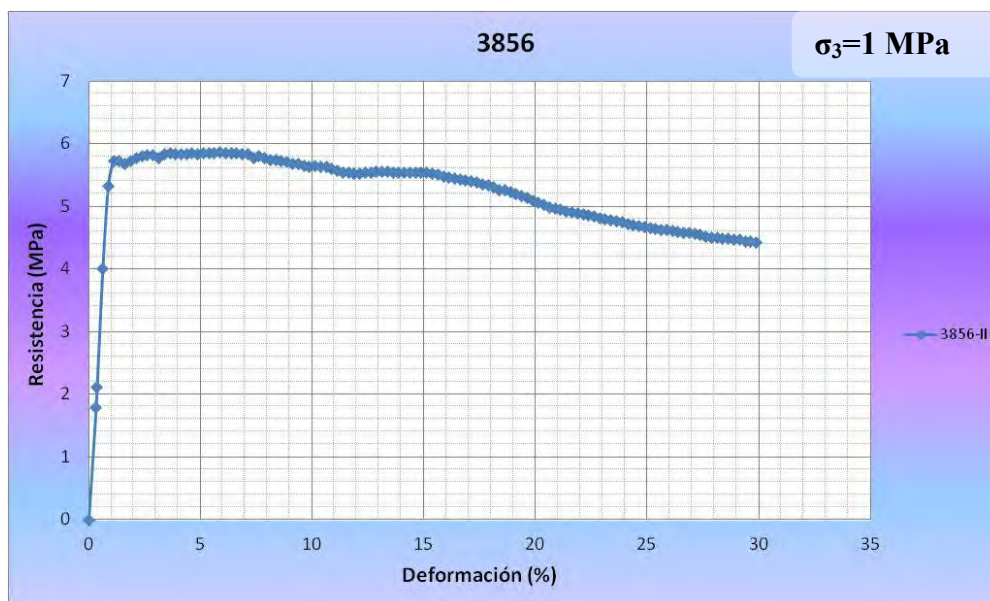
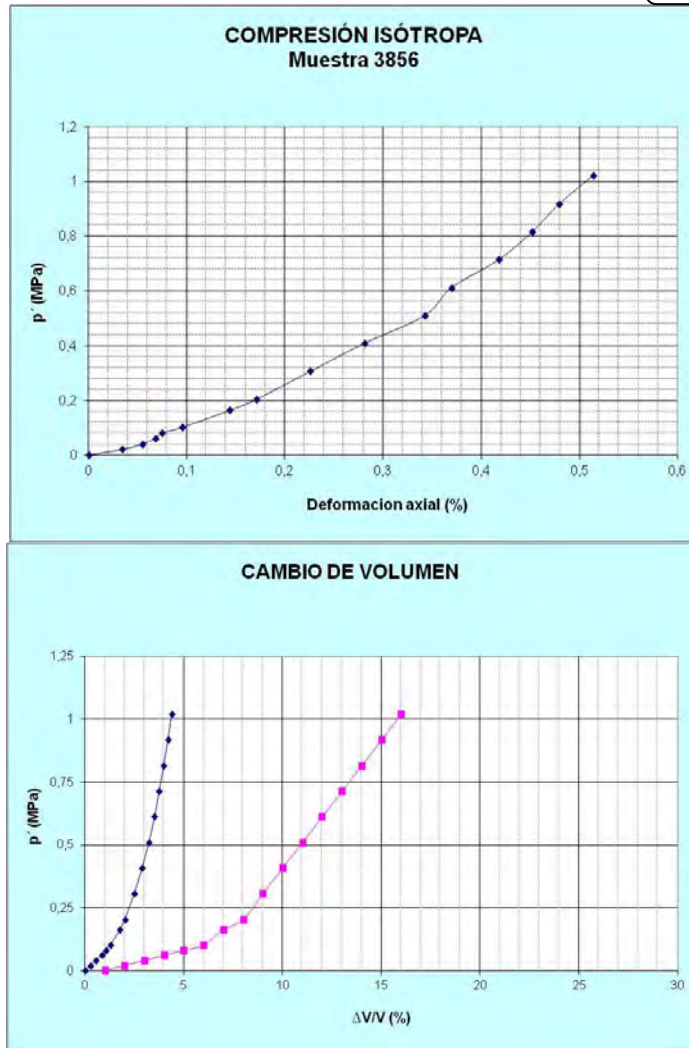
A-1.3.4.2.2.1 Muestra 3856-I.

$\gamma = 10.80 \text{ kN/m}^3$



A-1.3.4.2.2 Muestra 3856-II.

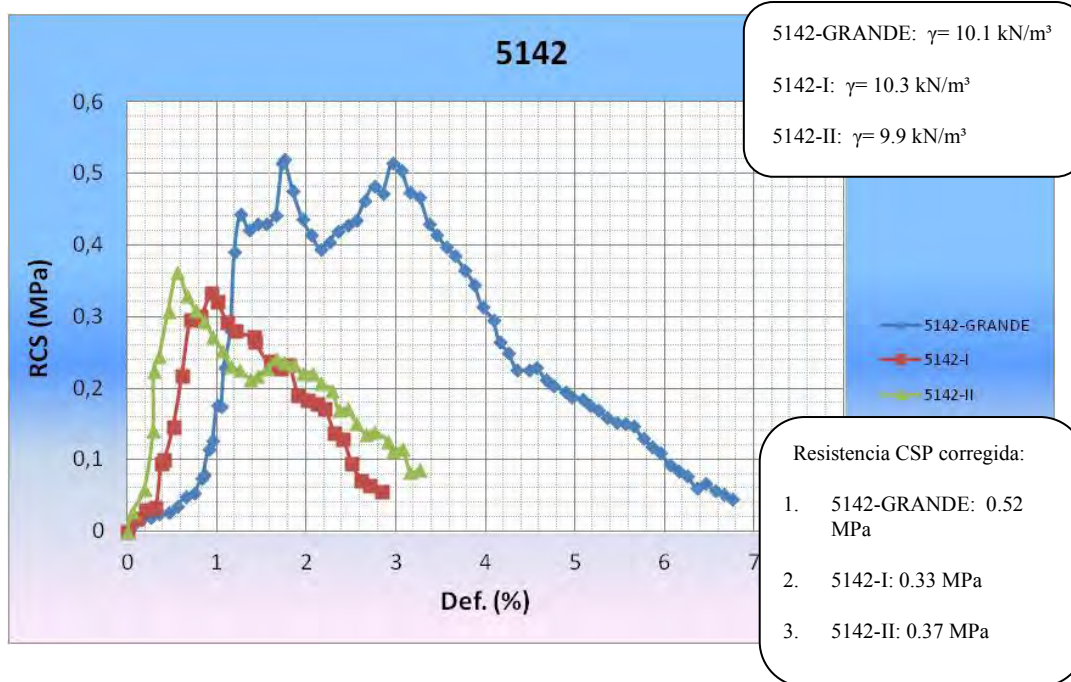
$\gamma = 12.23 \text{ kN/m}^3$



A-1.3.4.3 LPT.M-5142.



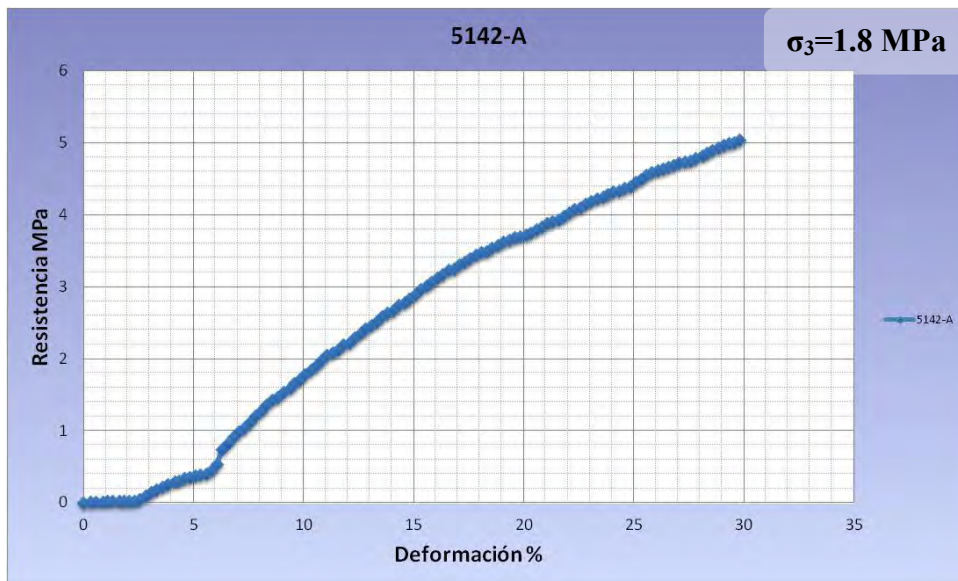
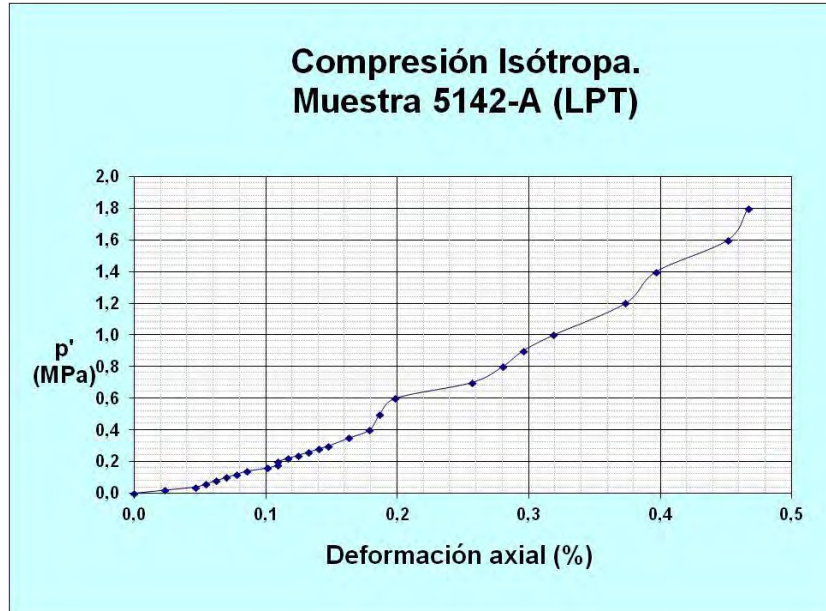
A-1.3.4.3.1 ENSAYO CSP.



A-1.3.4.3.2 ENSAYO CI+TIS.

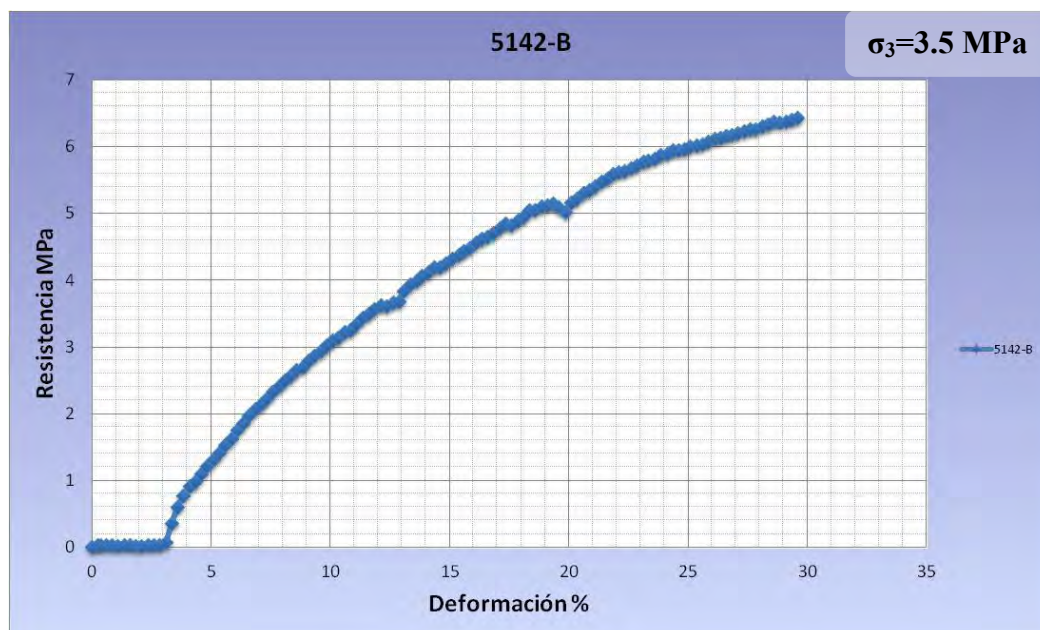
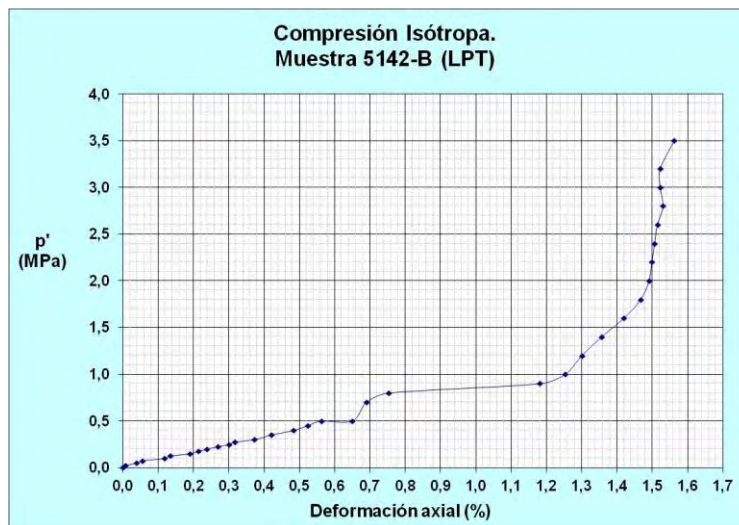
A-1.3.4.3.2.1 Muestra 5142-A.

$$\gamma = 10.35 \text{ kN/m}^3$$



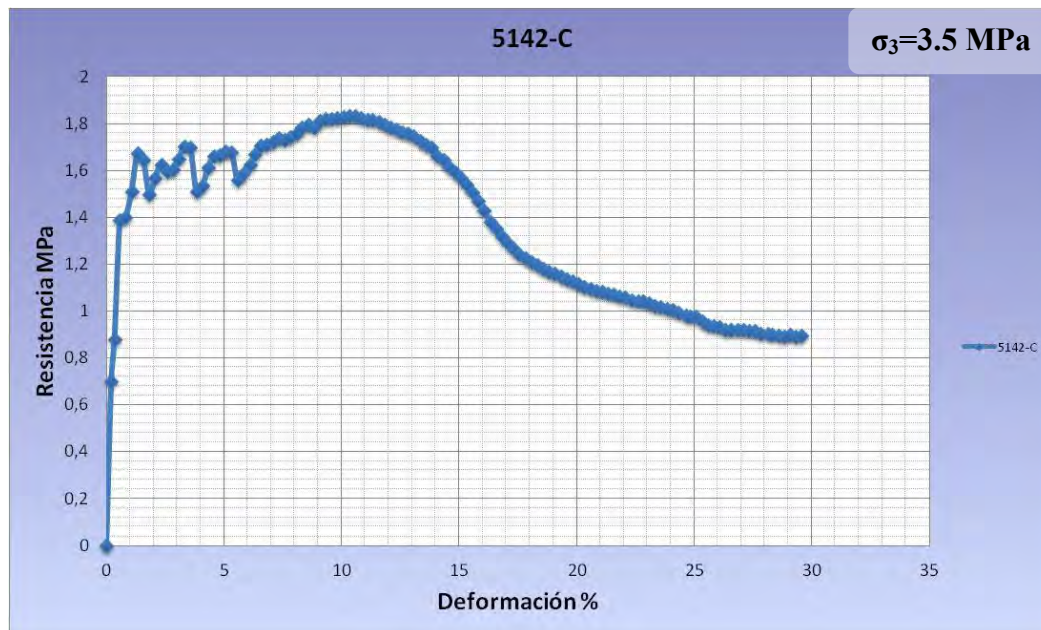
A-1.3.4.3.3 Muestra 5142-B.

$$\gamma = 8.92 \text{ kN/m}^3$$



A-1.3.4.3.4 Muestra 5142-C.

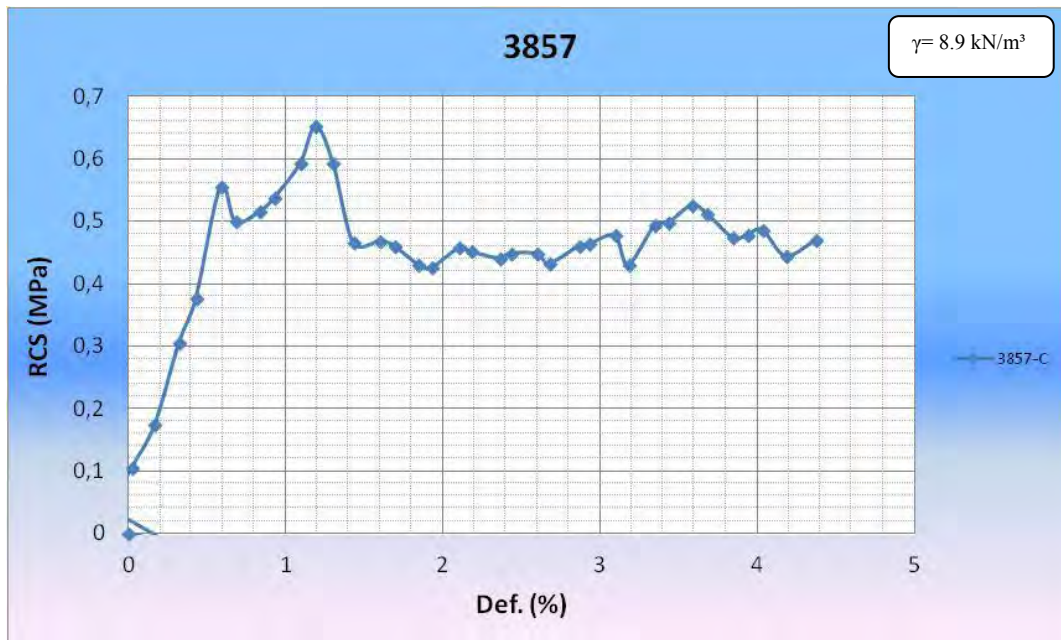
$\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$



A-1.3.4.4 LPT. M-3857.

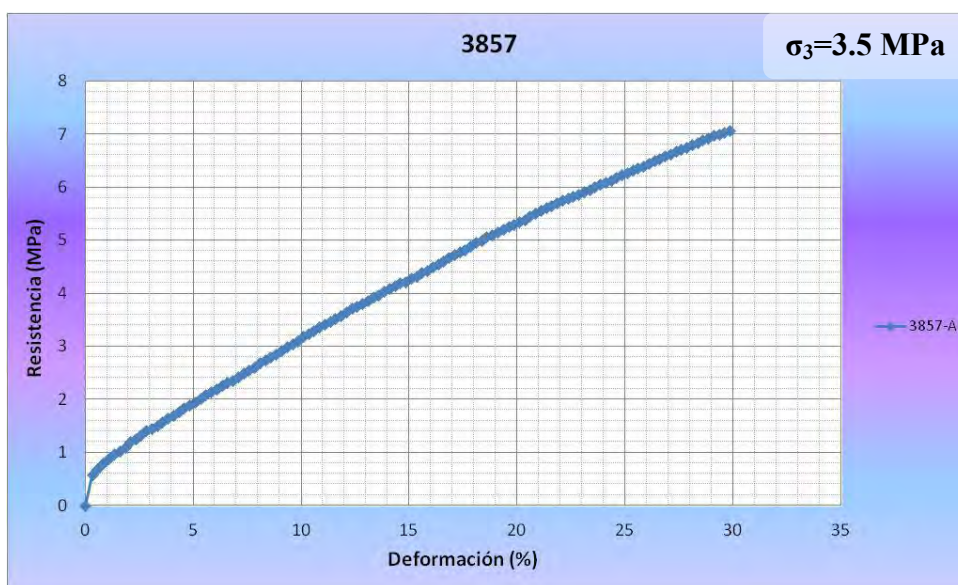
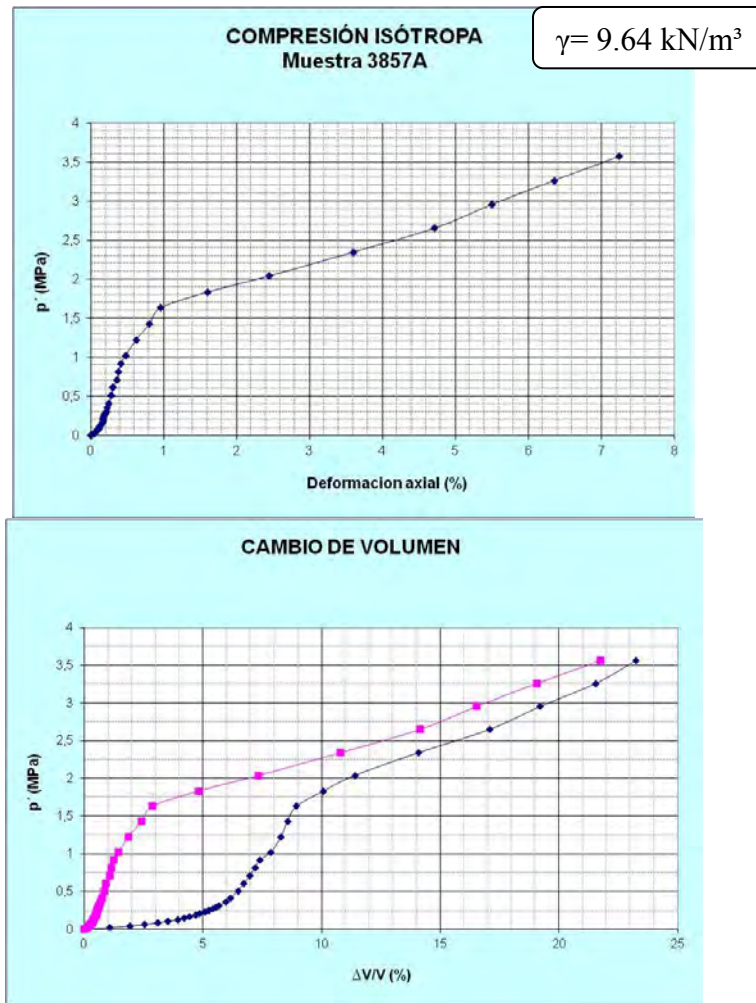


A-1.3.4.4.1 ENSAYO CSP.



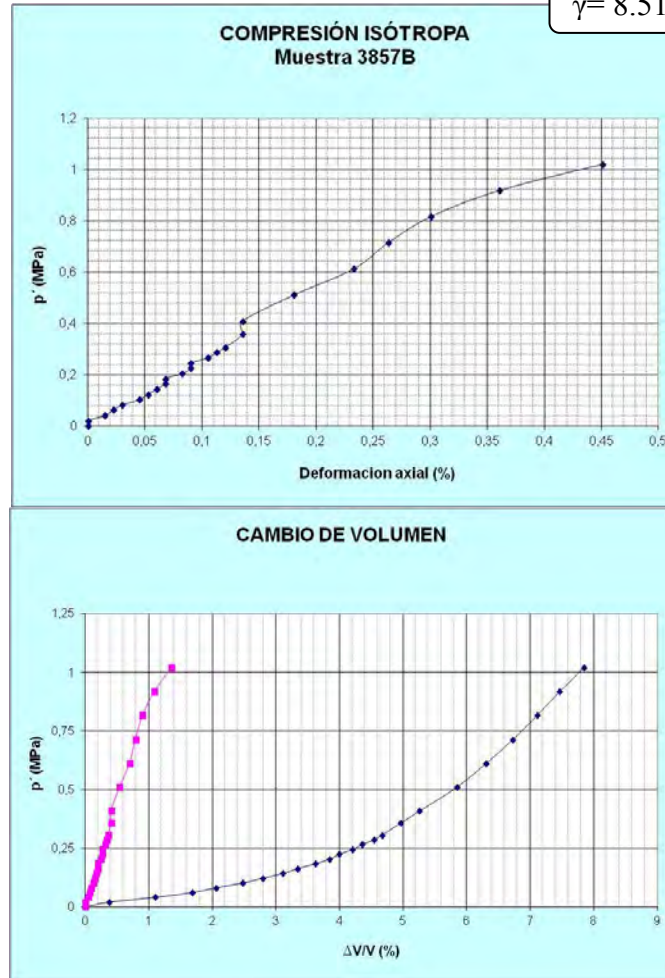
A-1.3.4.4.2 ENSAYO CI.

A-1.3.4.4.2.1 Muestra 3857-A.



A-1.3.4.4.3 Muestra 3857-B.

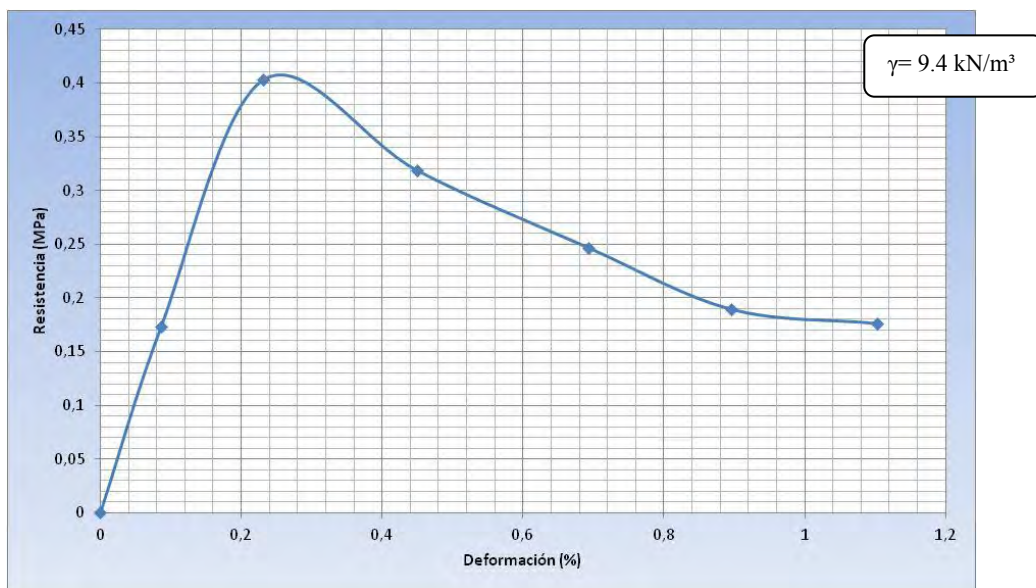
$$\gamma = 8.51 \text{ kN/m}^3$$



A-1.3.4.5 LPT. M-5143.

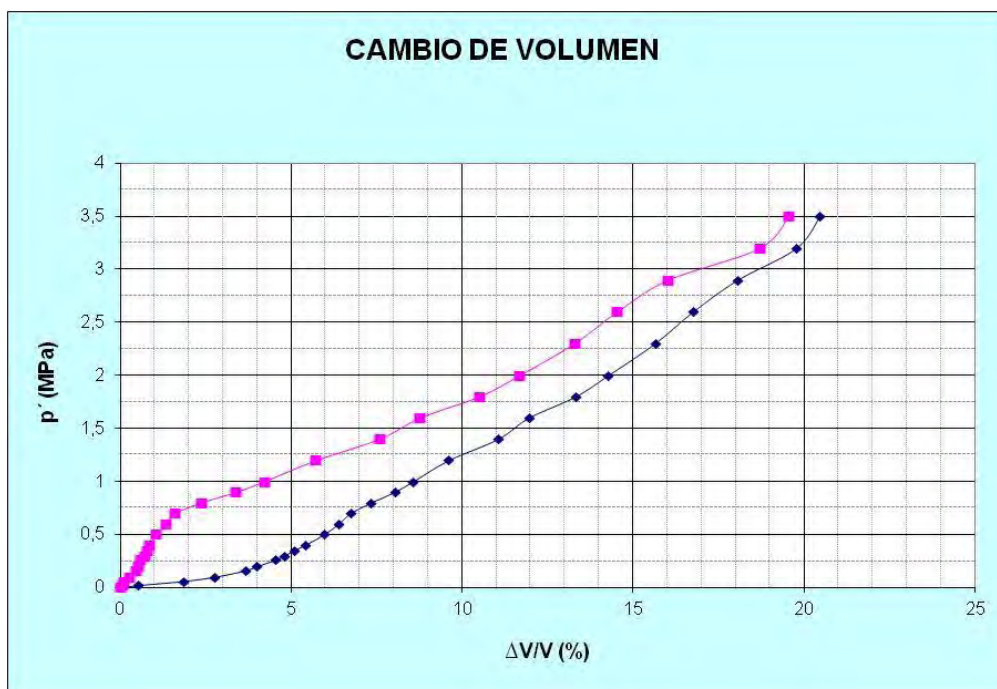
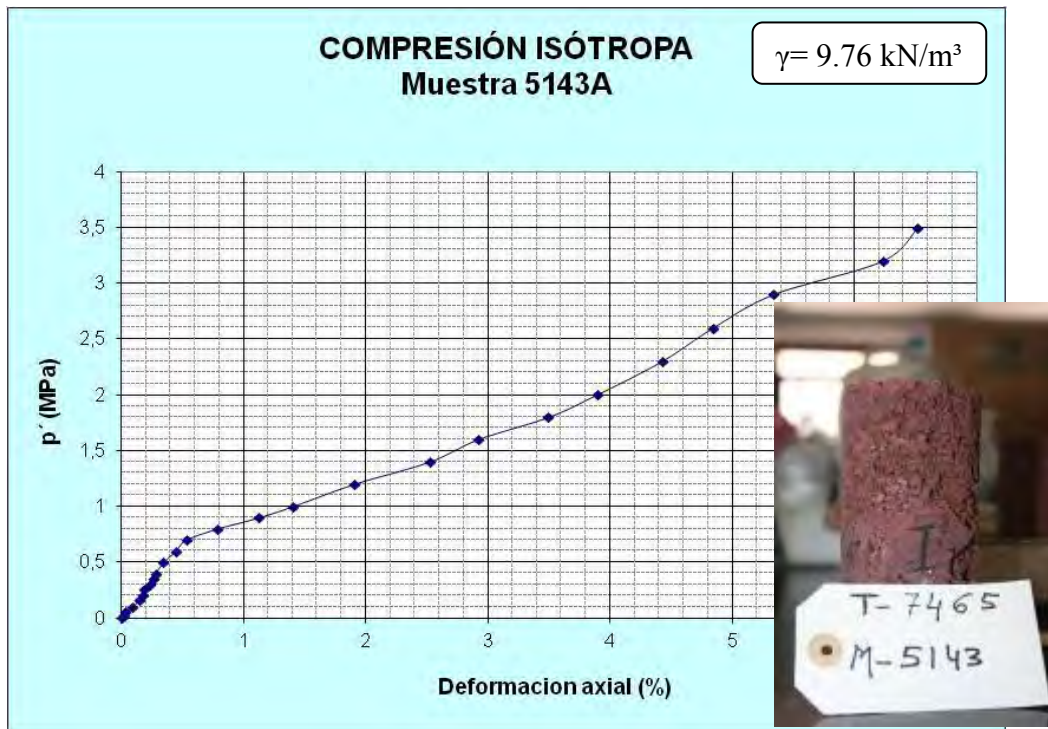


A-1.3.4.5.1 ENSAYO CSP.

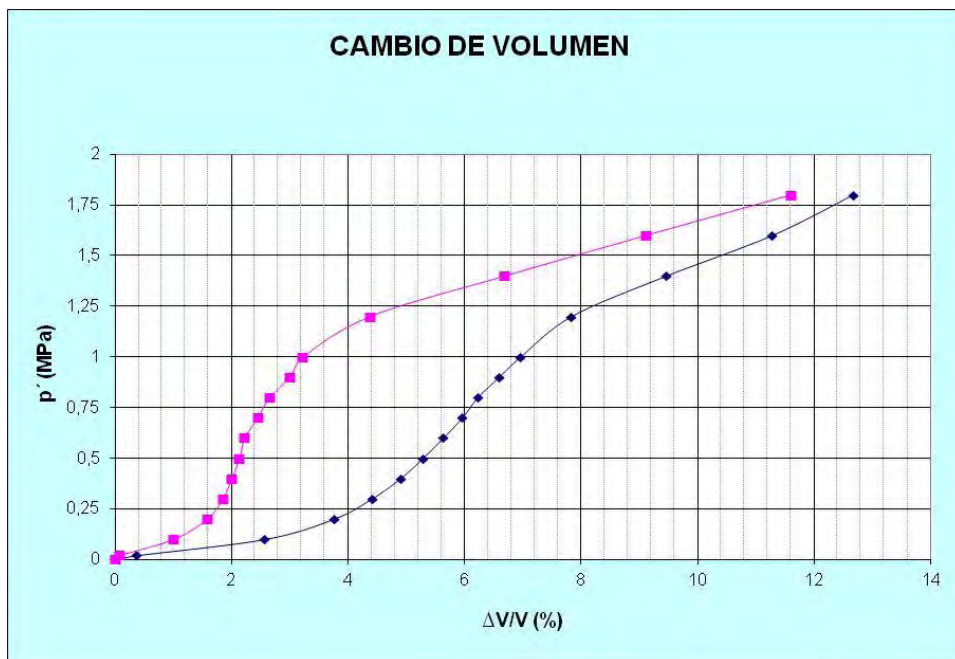
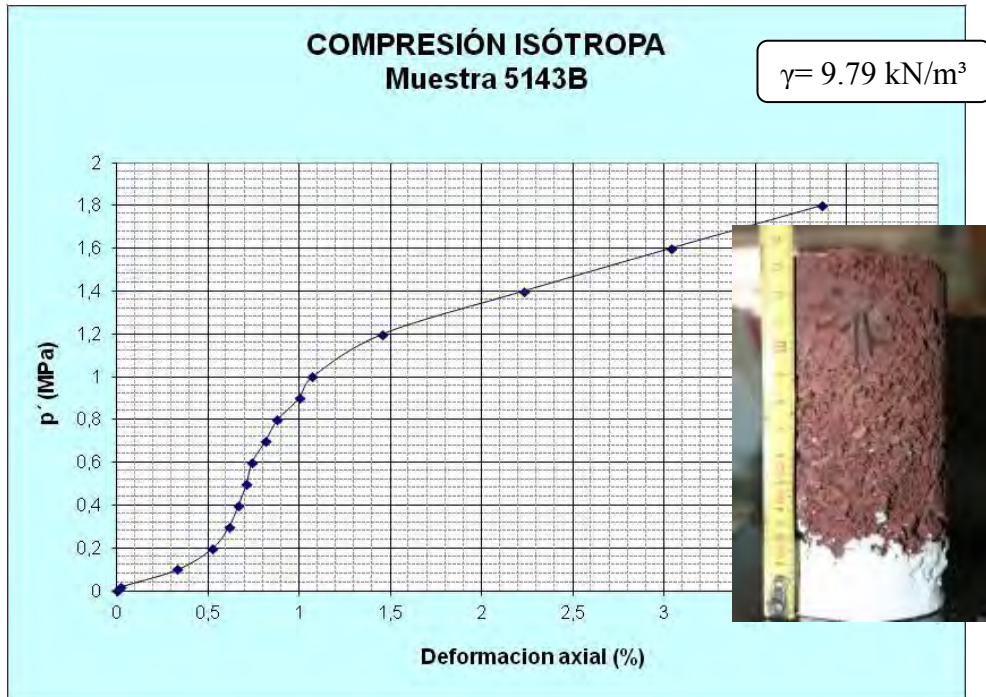


A-1.3.4.5.2 ENSAYO CI.

A-1.3.4.5.2.1 Muestra 5143^a.



A-1.3.4.5.2.2 Muestra 5143B.



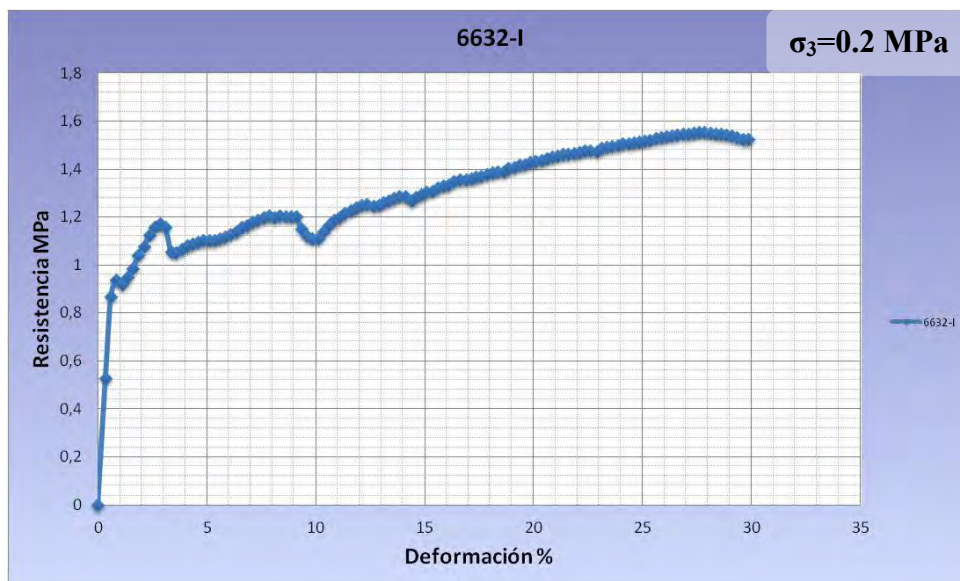
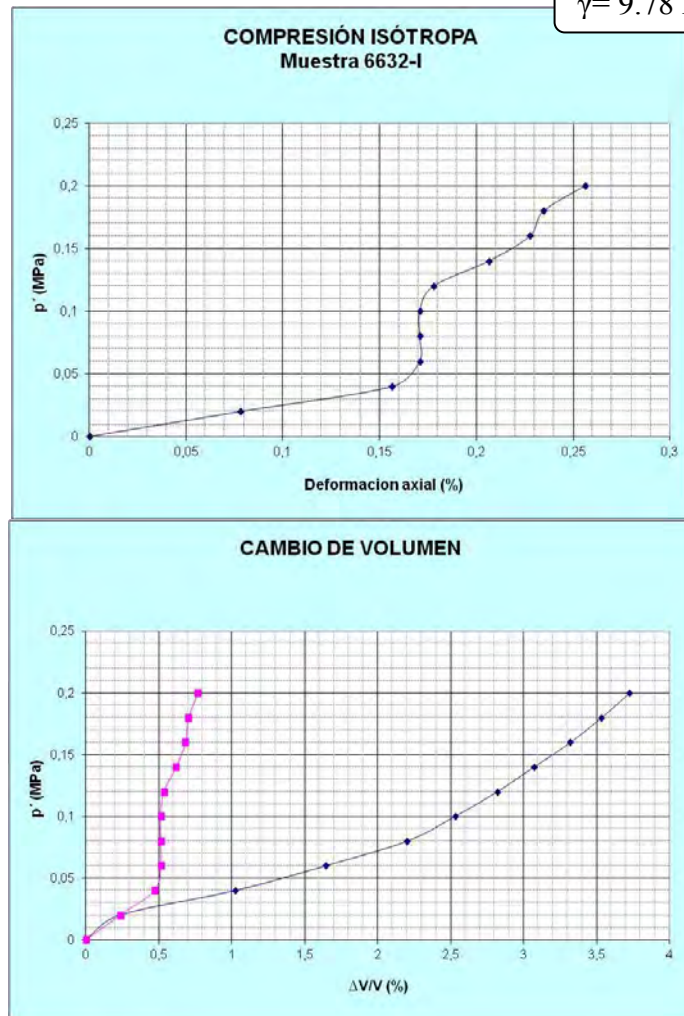
A-1.3.4.6 LPT. M-6632.



A-1.3.4.6.1 ENSAYO CI + TIS.

A-1.3.4.6.1.1 Muestra 6632-I.

$$\gamma = 9.78 \text{ kN/m}^3$$



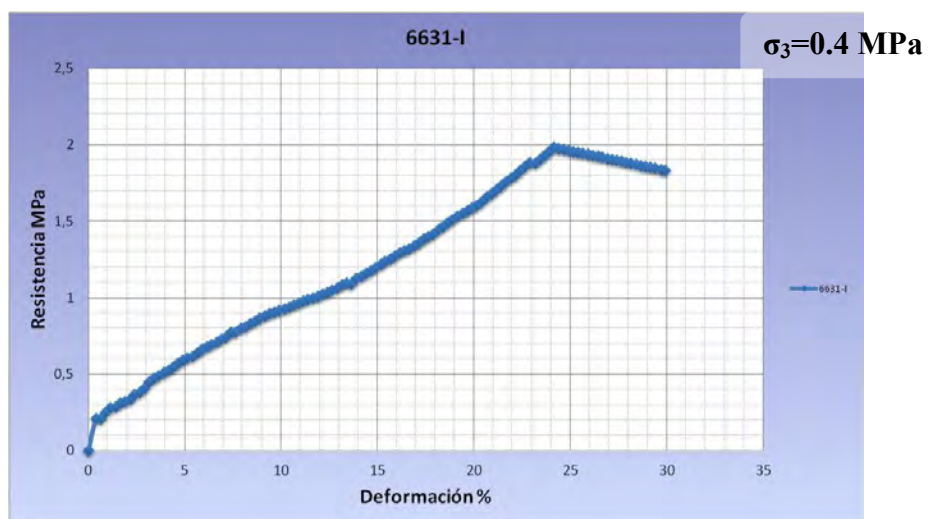
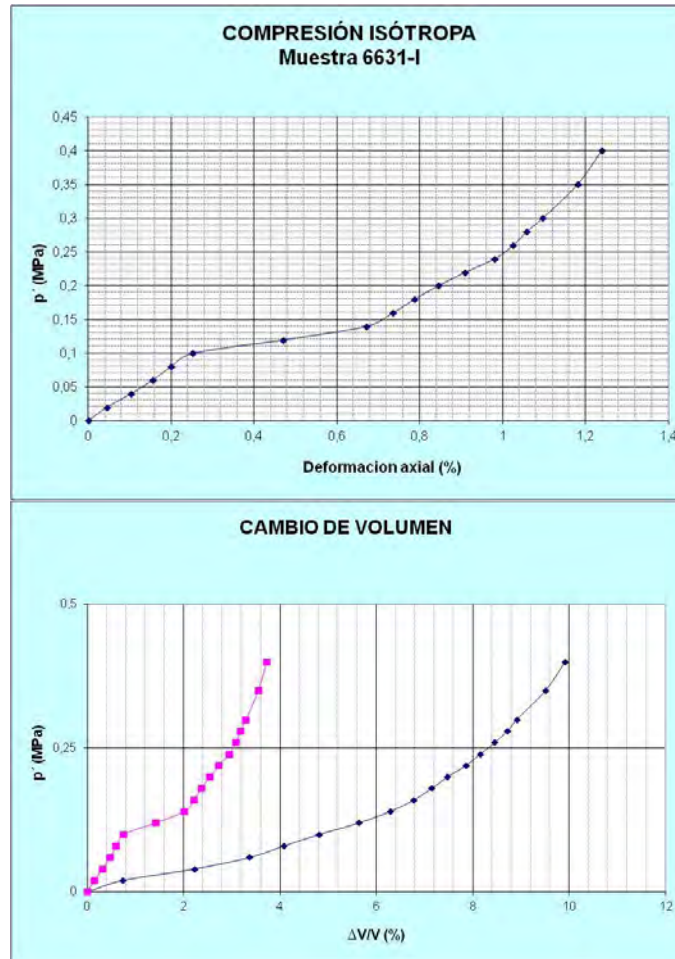
A-1.3.4.7 LPT. M-6631.



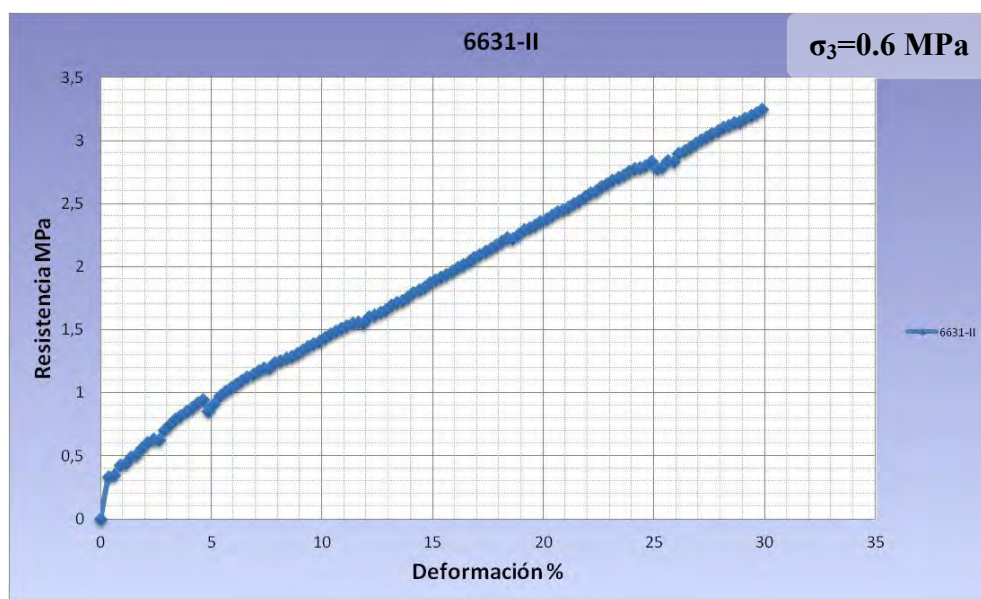
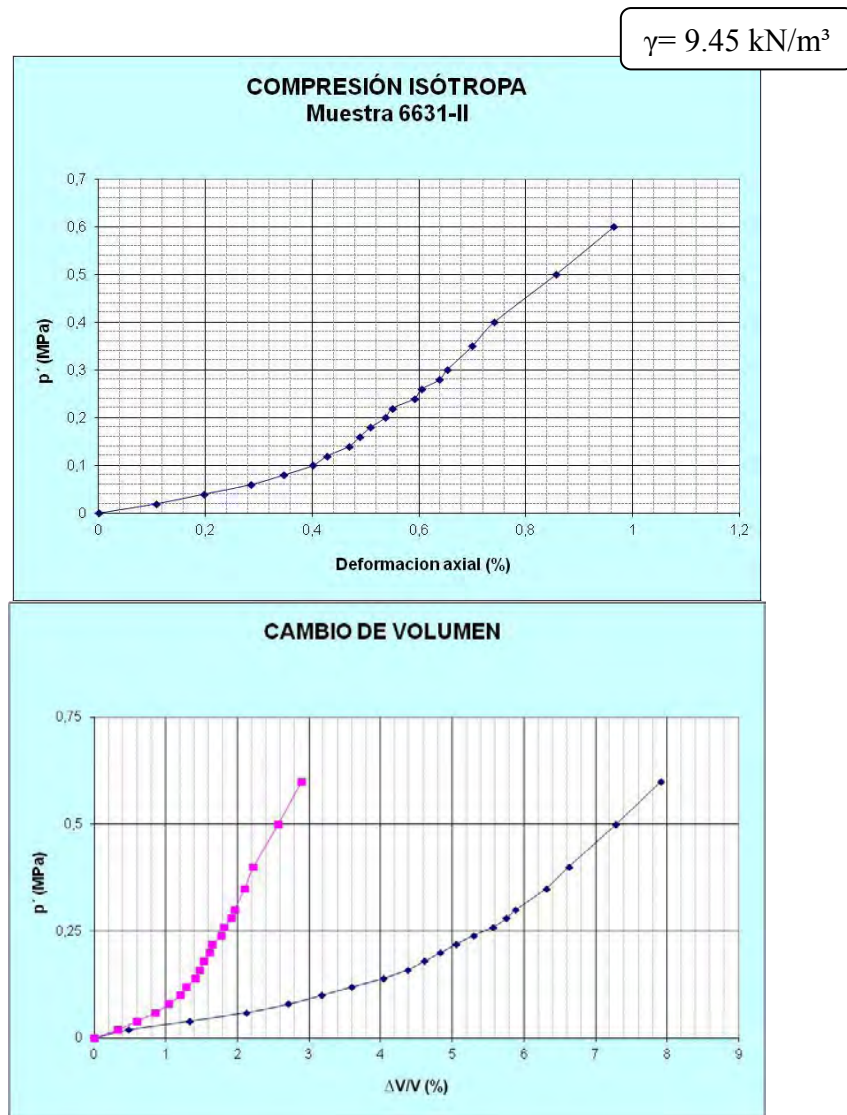
A-1.3.4.7.1 ENSAYO CI + TIS.

A-1.3.4.7.1.1 Muestra 6631-I.

$$\gamma = 9.02 \text{ kN/m}^3$$



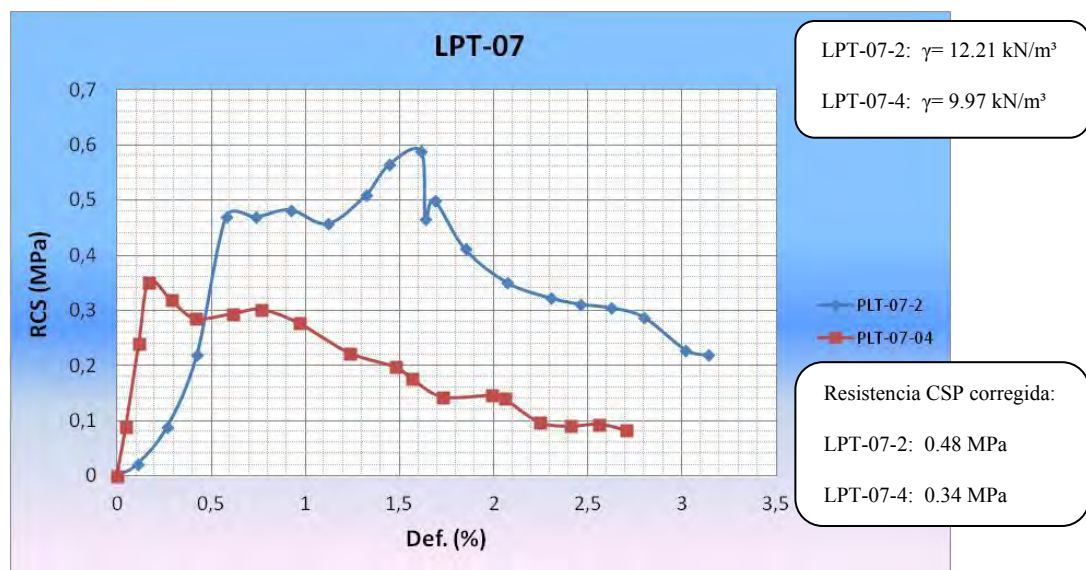
A-1.3.4.7.1.2 Muestra 6631-II.



A-1.4 M-LPT-07.



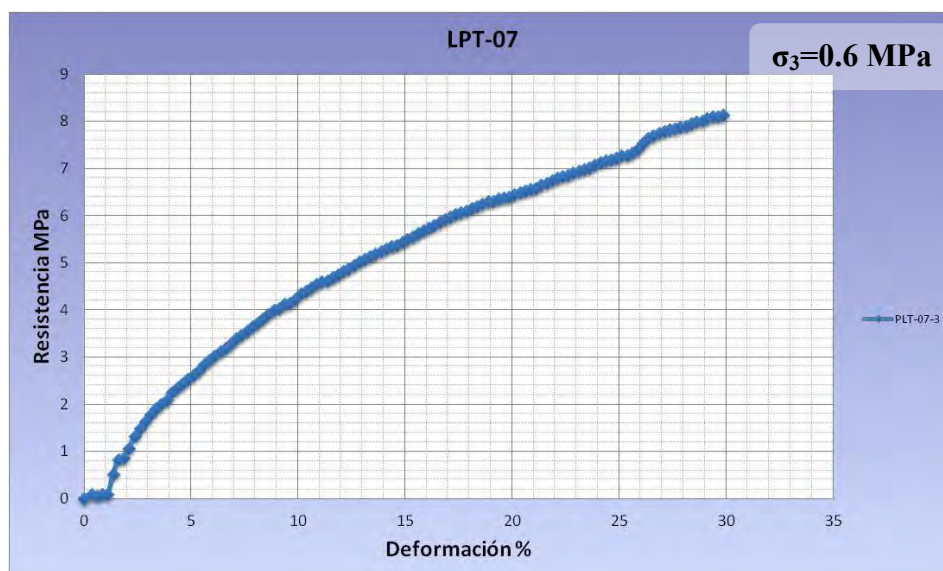
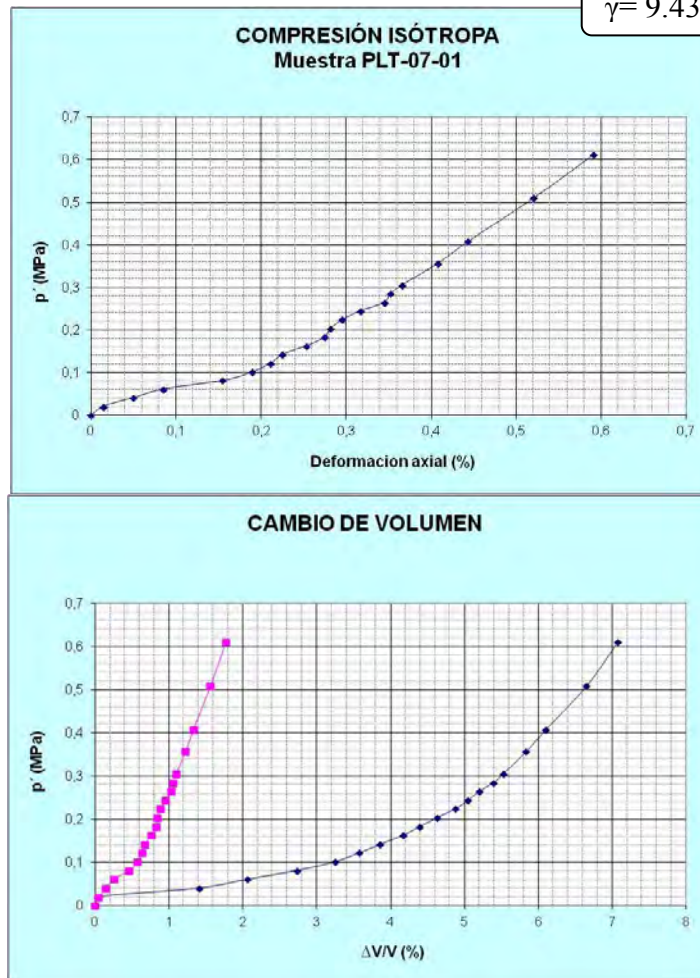
A-1.4.1.1.1 ENSAYO CSP.



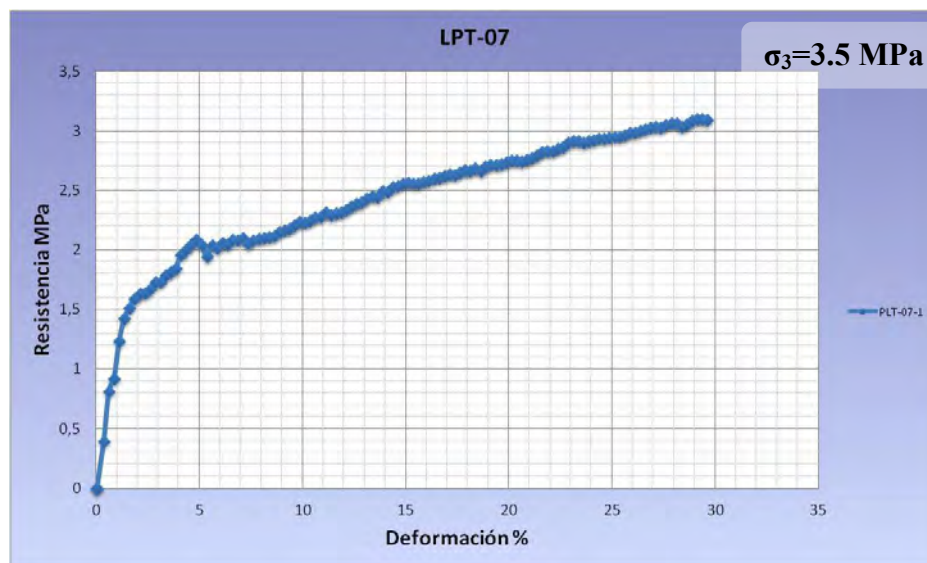
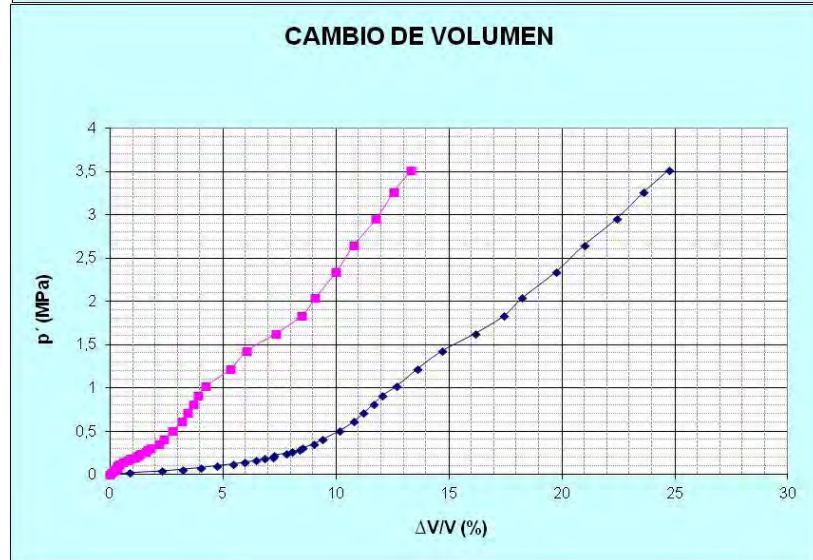
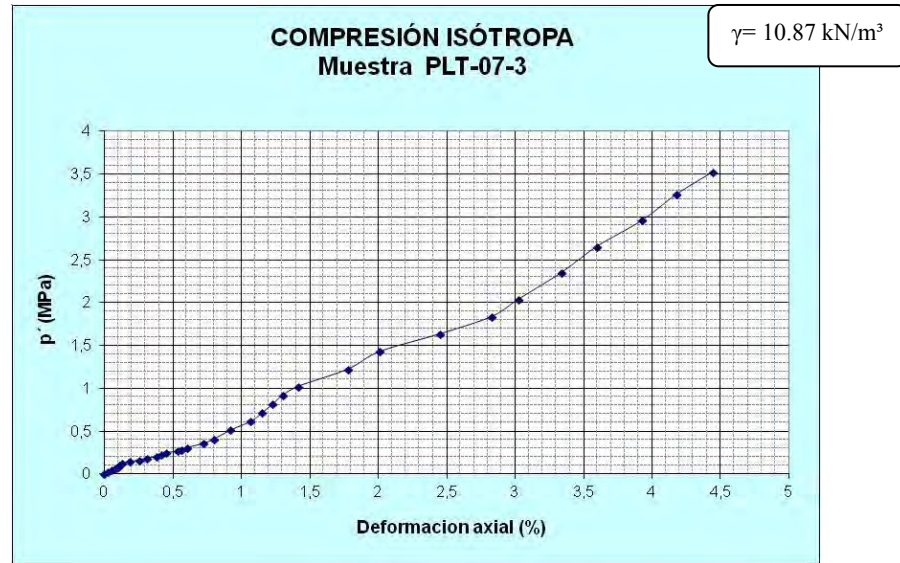
A-1.4.1.1.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.4.1.1.2.1 Muestra PLT-07-01.

$$\gamma = 9.43 \text{ kN/m}^3$$



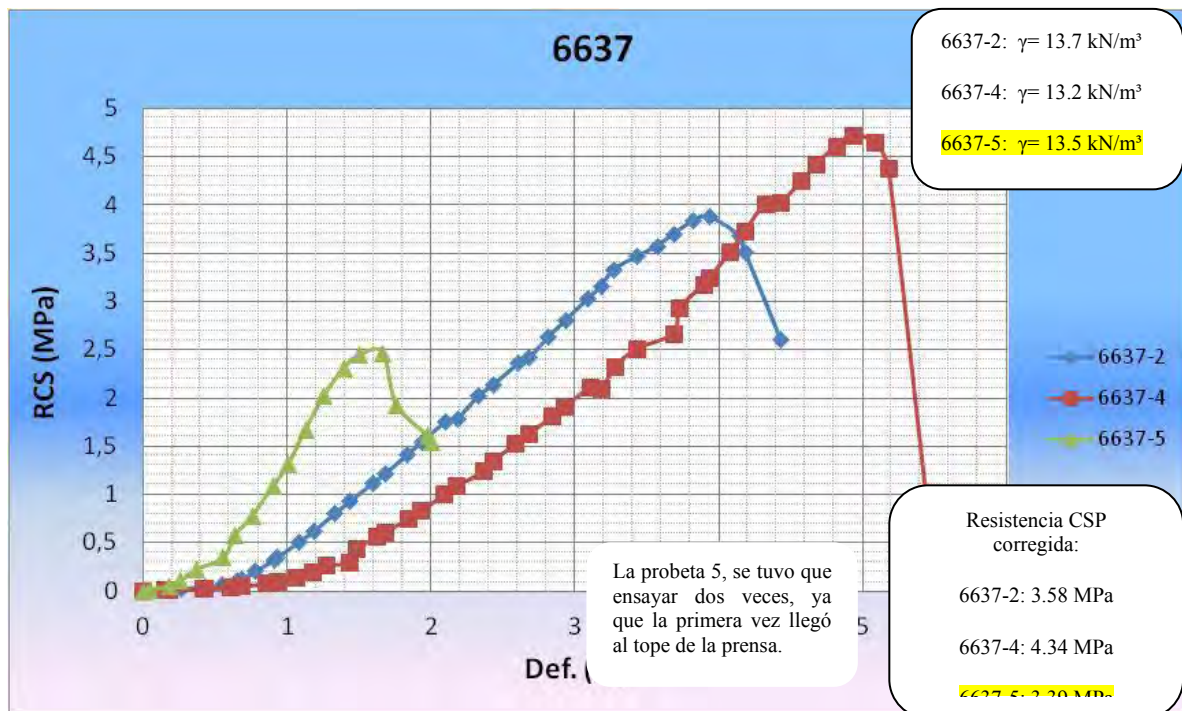
A-1.4.1.1.2.2 Muestra PLT-07-03.



A-1.4.1.2 LPT-CBT. M-6637.



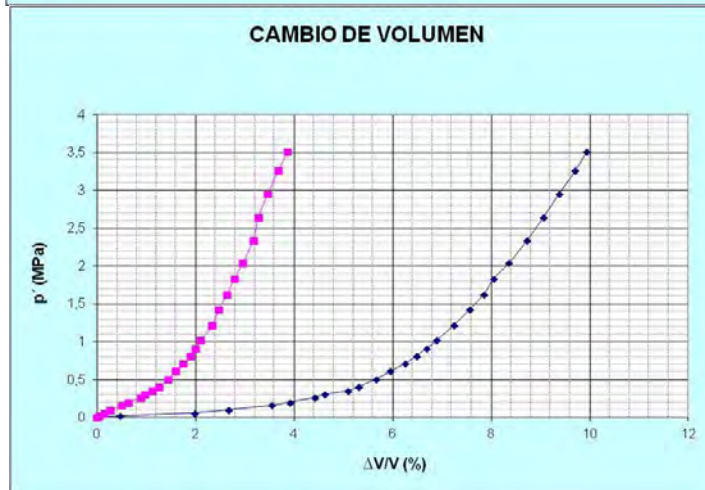
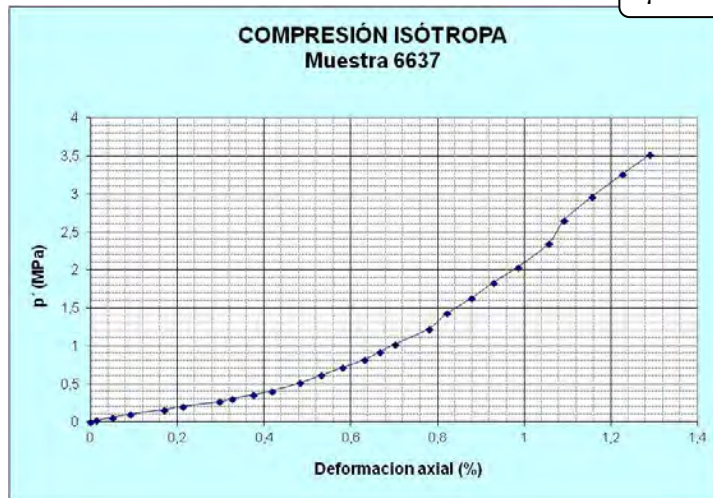
A-1.4.1.2.1 ENSAYO CSP.



A-1.5 ENSAYO CI + TIS.

1. Muestra 6637-I.

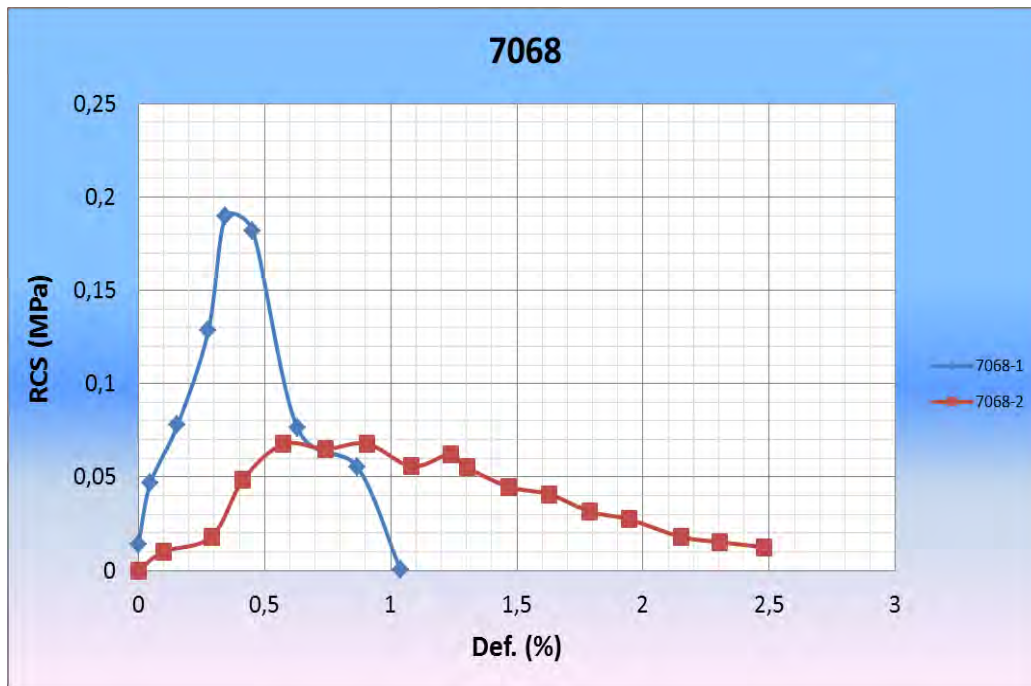
$$\gamma = 13.3 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.1 LPT. M-7068.

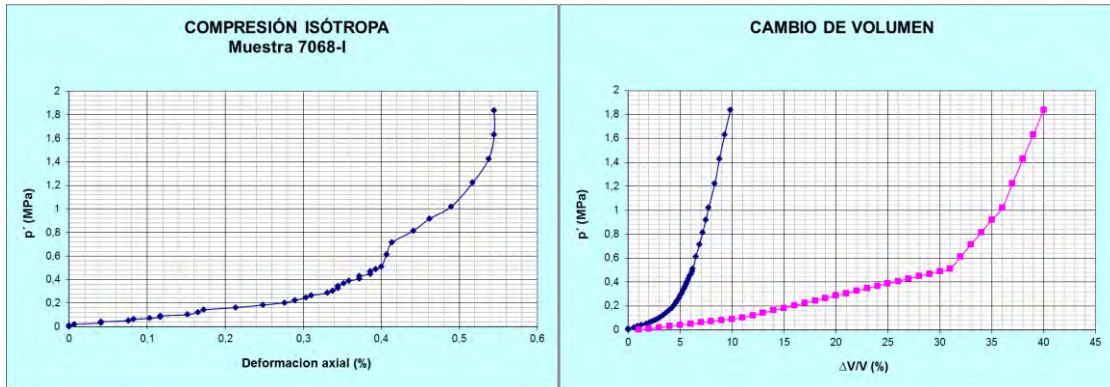


A-1.5.1.1.1 ENSAYO CSP.

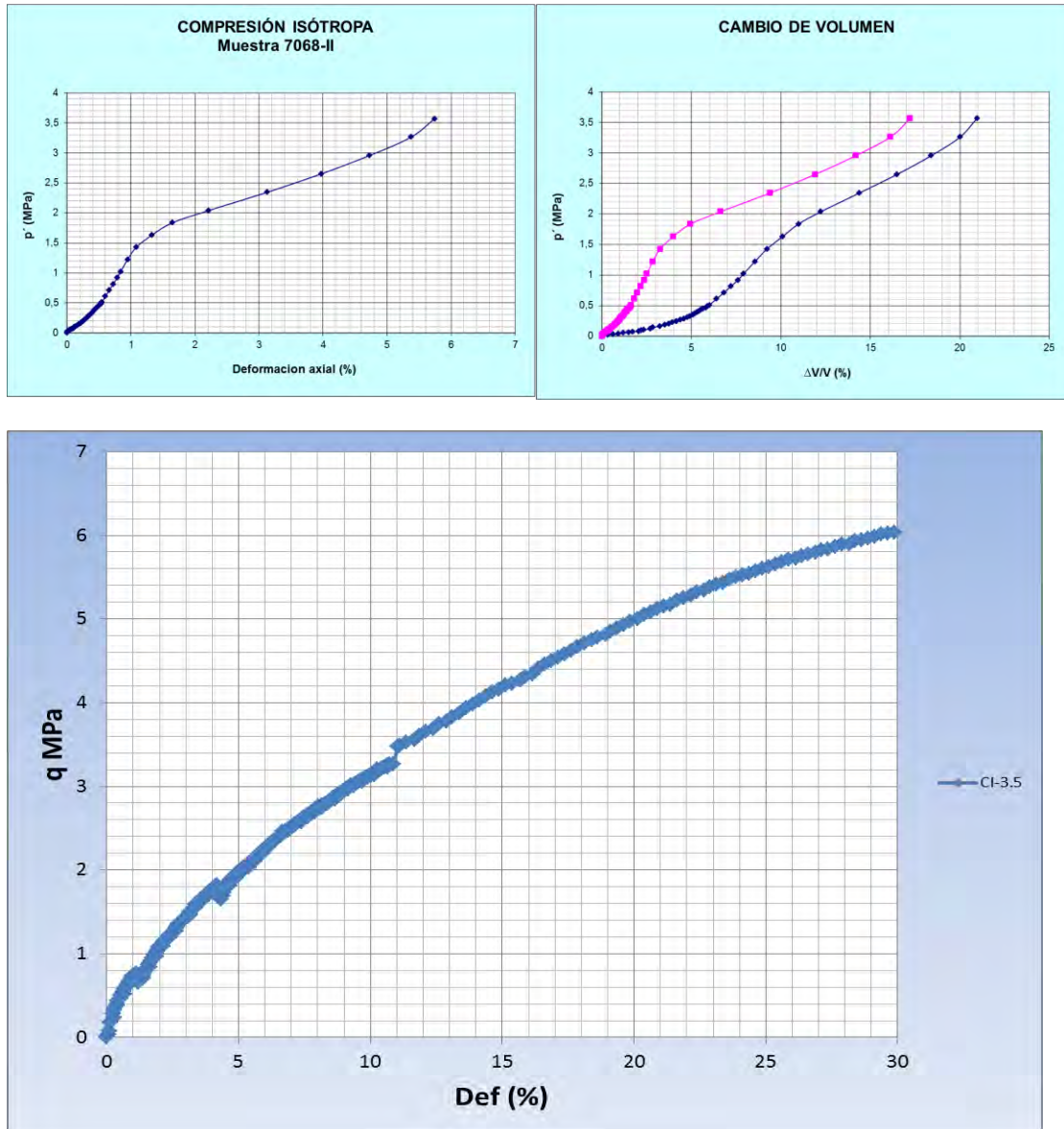


A-1.5.1.1.2 ENSAYO CI + TIS.

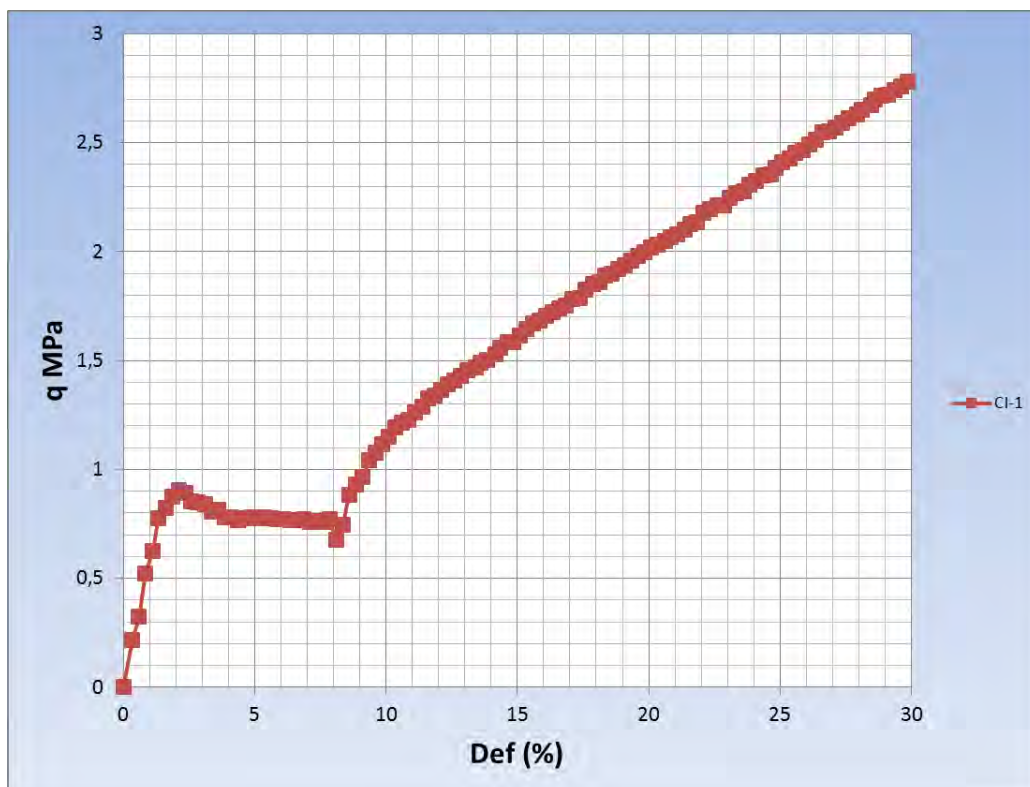
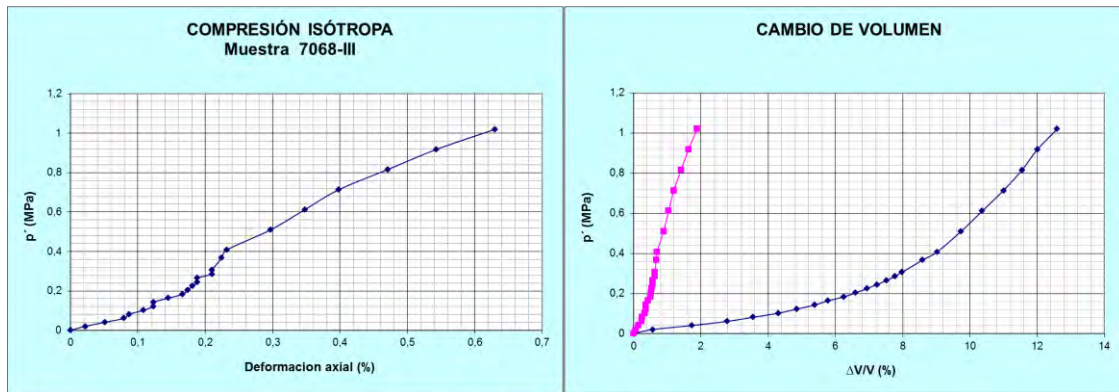
A-1.5.1.1.2.1 Muestra 7068-I.



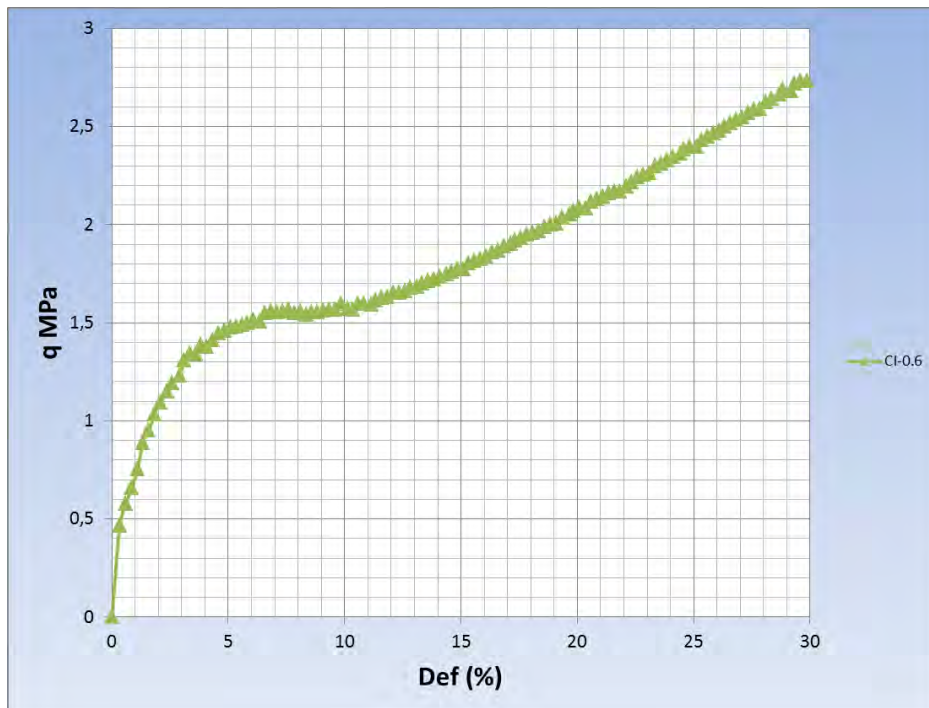
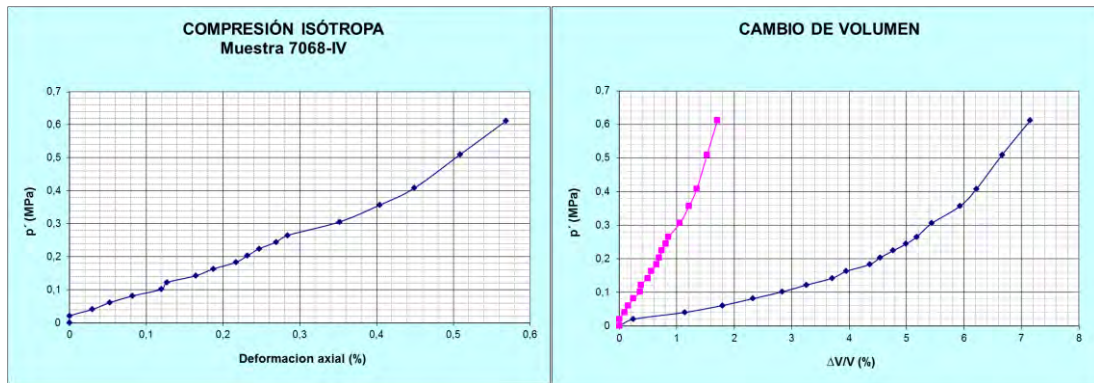
A-1.5.1.1.2.2 Muestra 7068-II.



A-1.5.1.1.2.3 Muestra 7068-III.



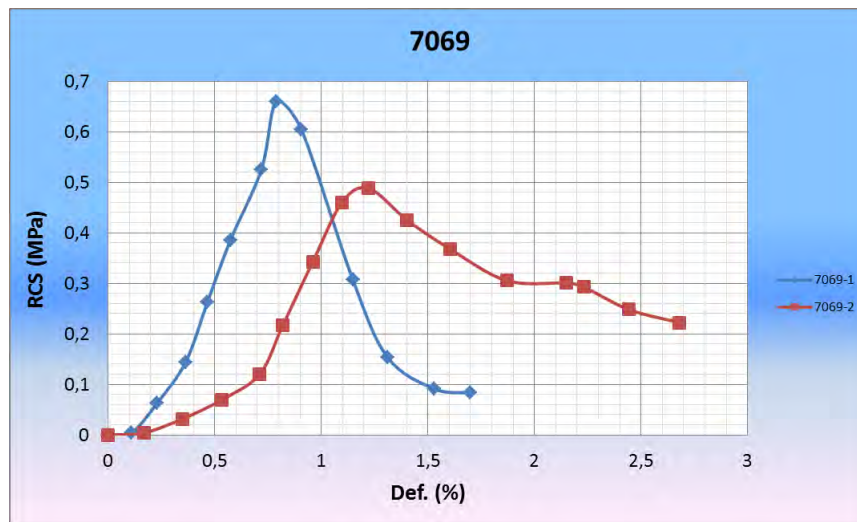
A-1.5.1.1.2.4 Muestra 7068-IV.



A-1.5.1.2 LPT. M-7069.



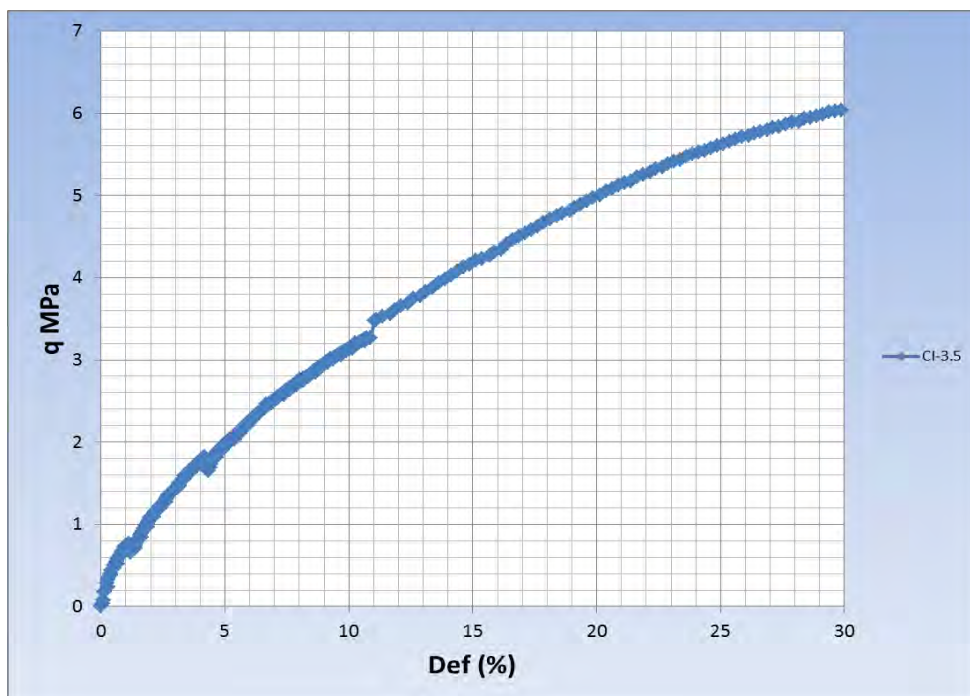
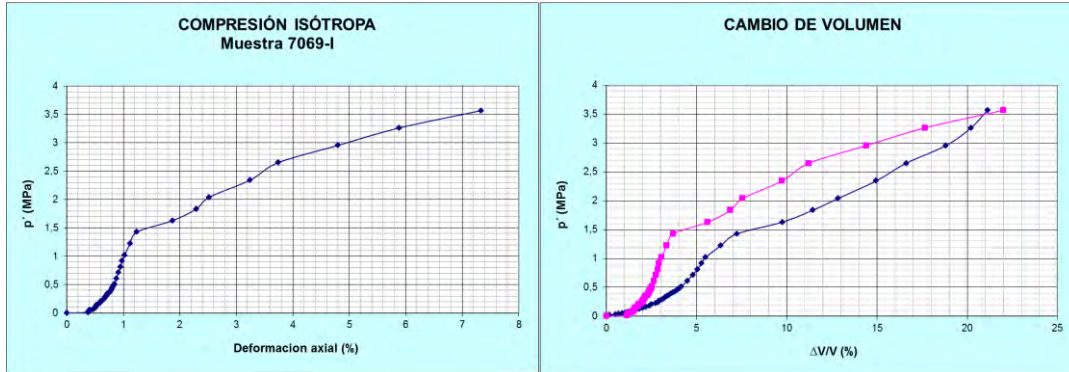
A-1.5.1.2.1 ENSAYO CSP.



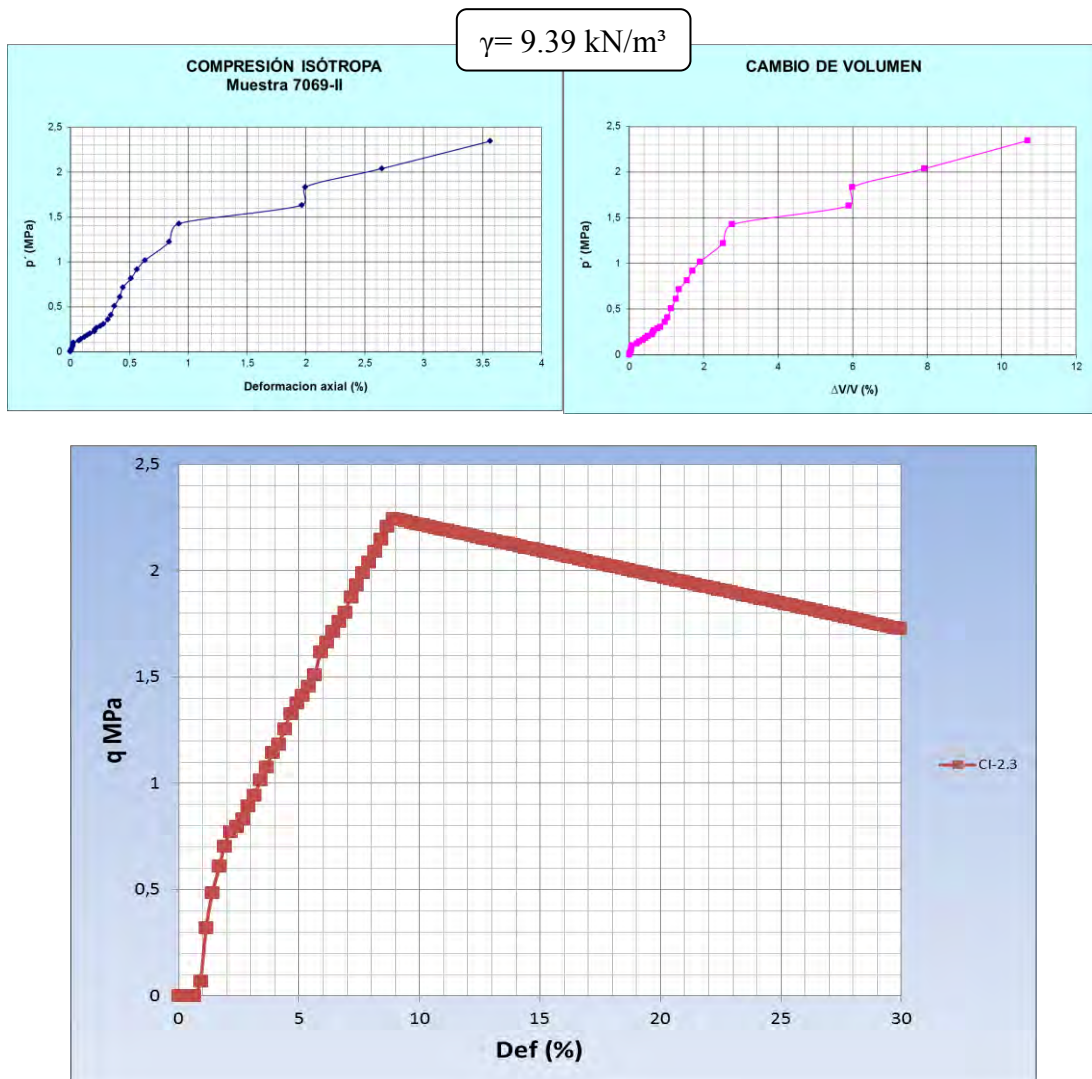
A-1.5.1.2.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.2.2.1 Muestra 7069-I.

$$\gamma = 8.64 \text{ kN/m}^3$$



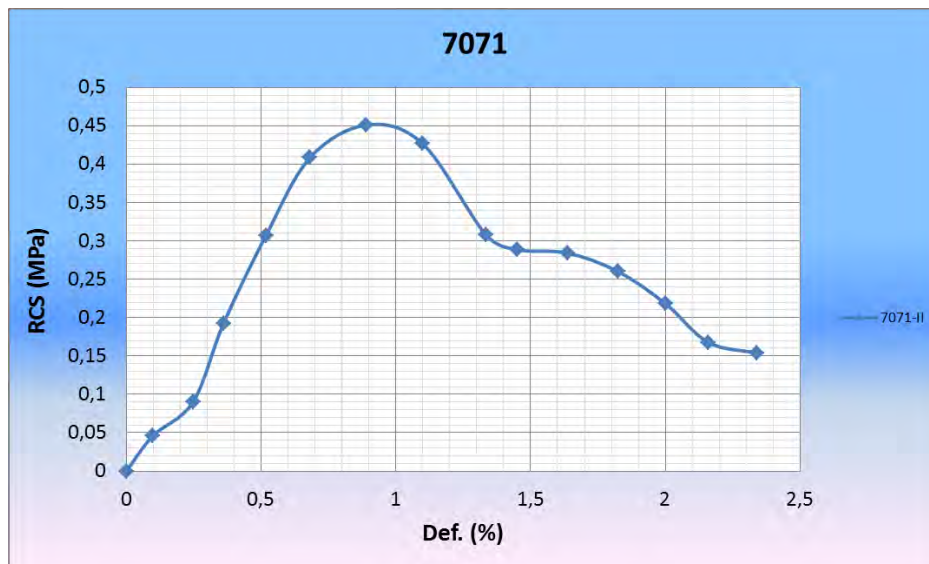
A-1.5.1.2.2.2 Muestra 7069-II.



A-1.5.1.2.3 LPT. M-7071.



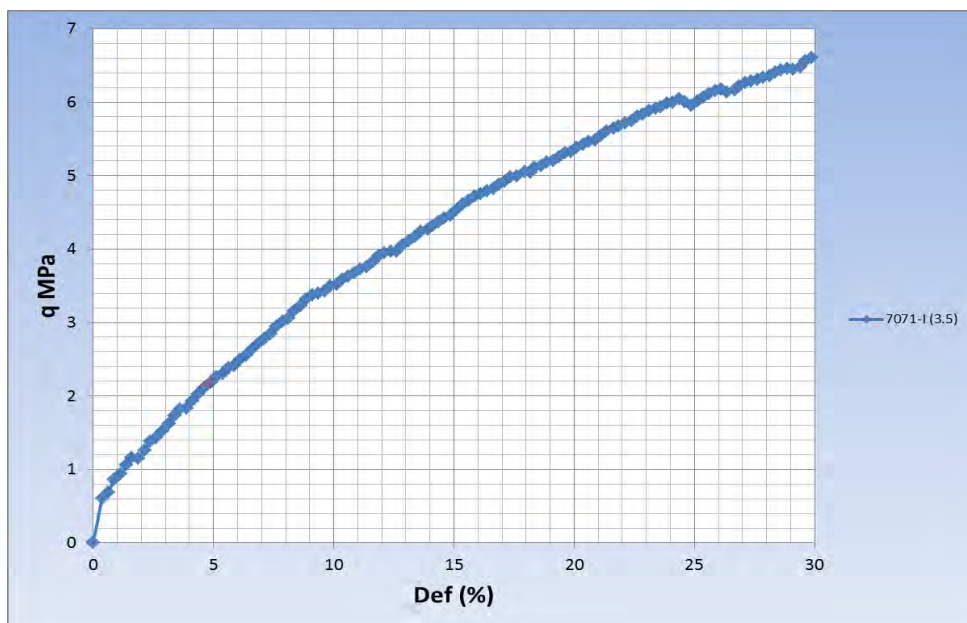
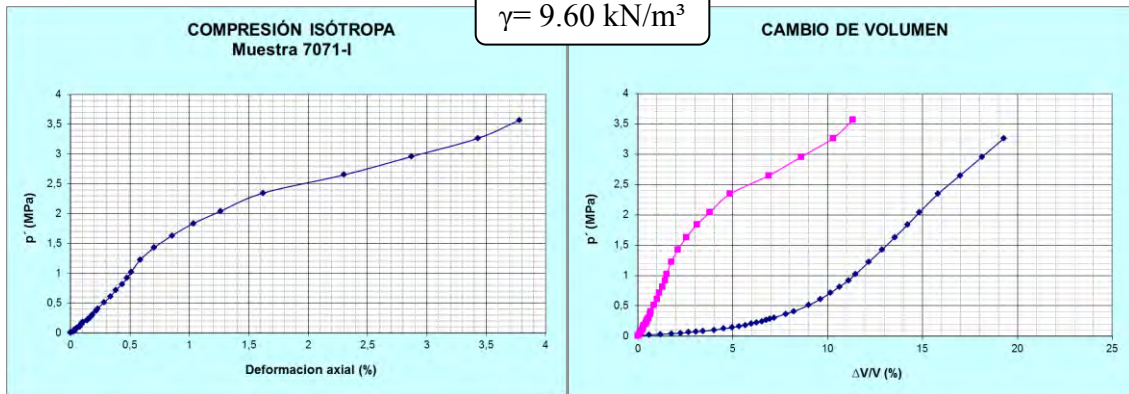
A-1.5.1.2.3.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.2.4 ENSAYO CI + TIS.

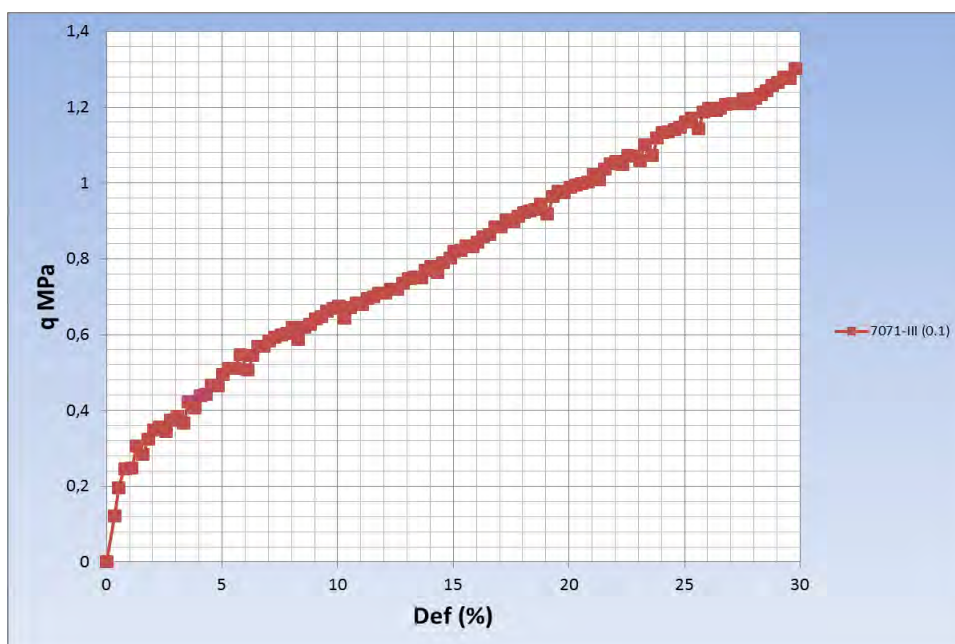
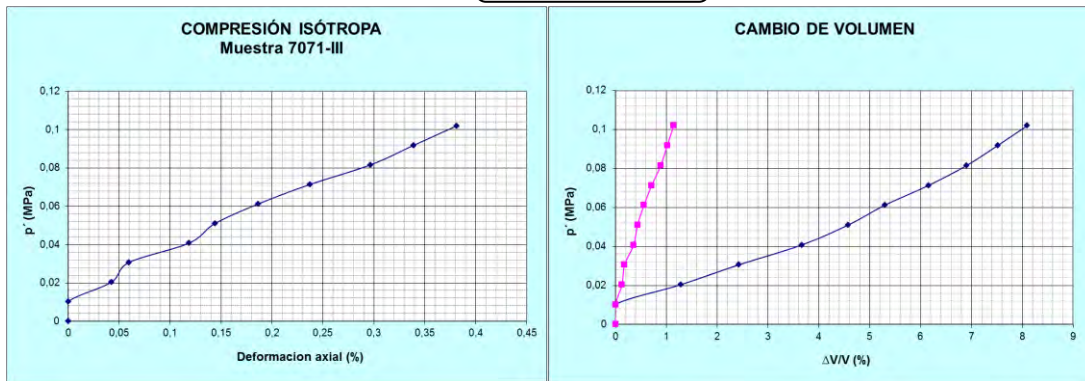
A-1.5.1.2.4.1 Muestra 7071.

$$\gamma = 9.60 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.2.4.2 Muestra 7071-III.

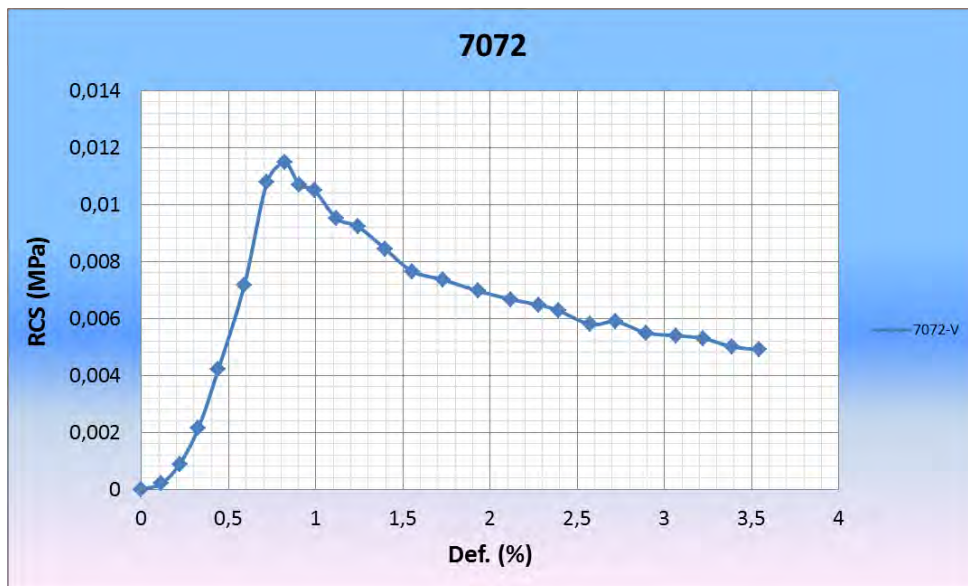
$$\gamma = 8.89 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.3 LPT. M-7072.



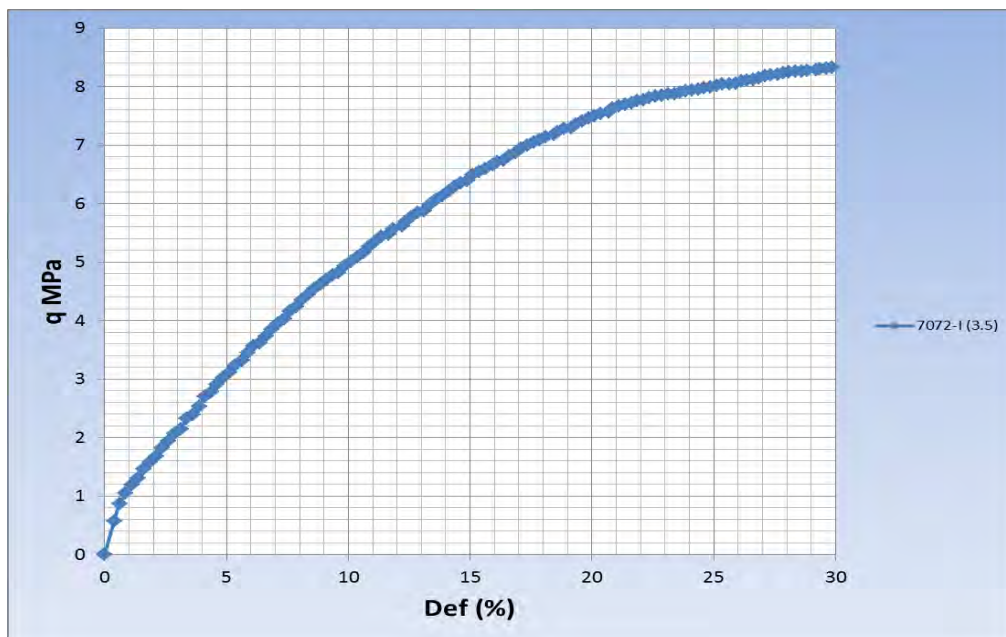
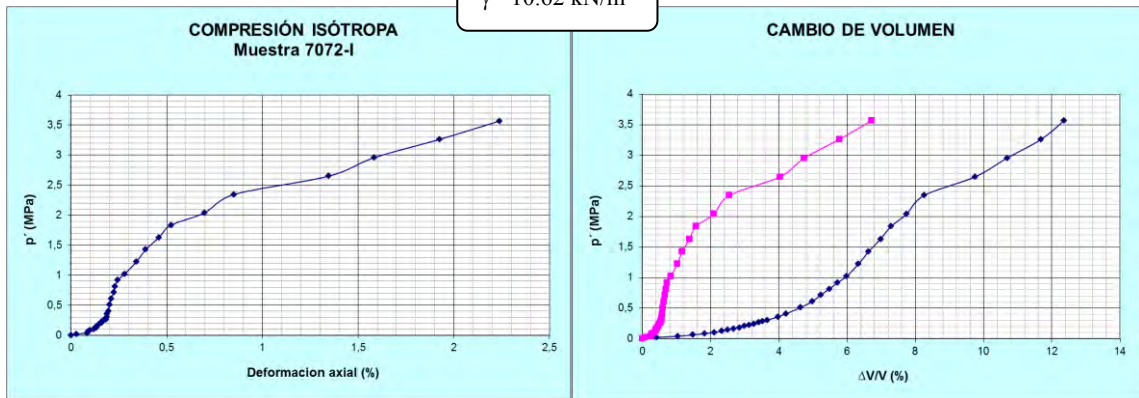
A-1.5.1.3.1 ENSAYO CSP.



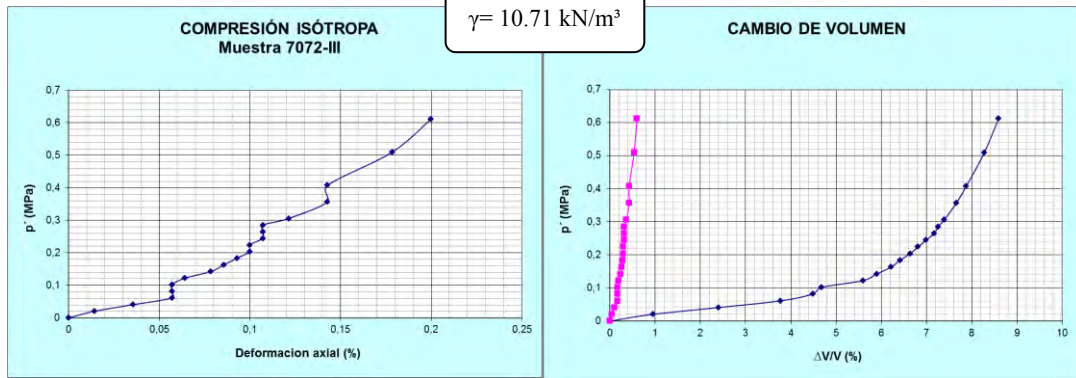
A-1.5.1.3.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.3.2.1 Muestra 7072-I.

$$\gamma = 10.62 \text{ kN/m}^3$$

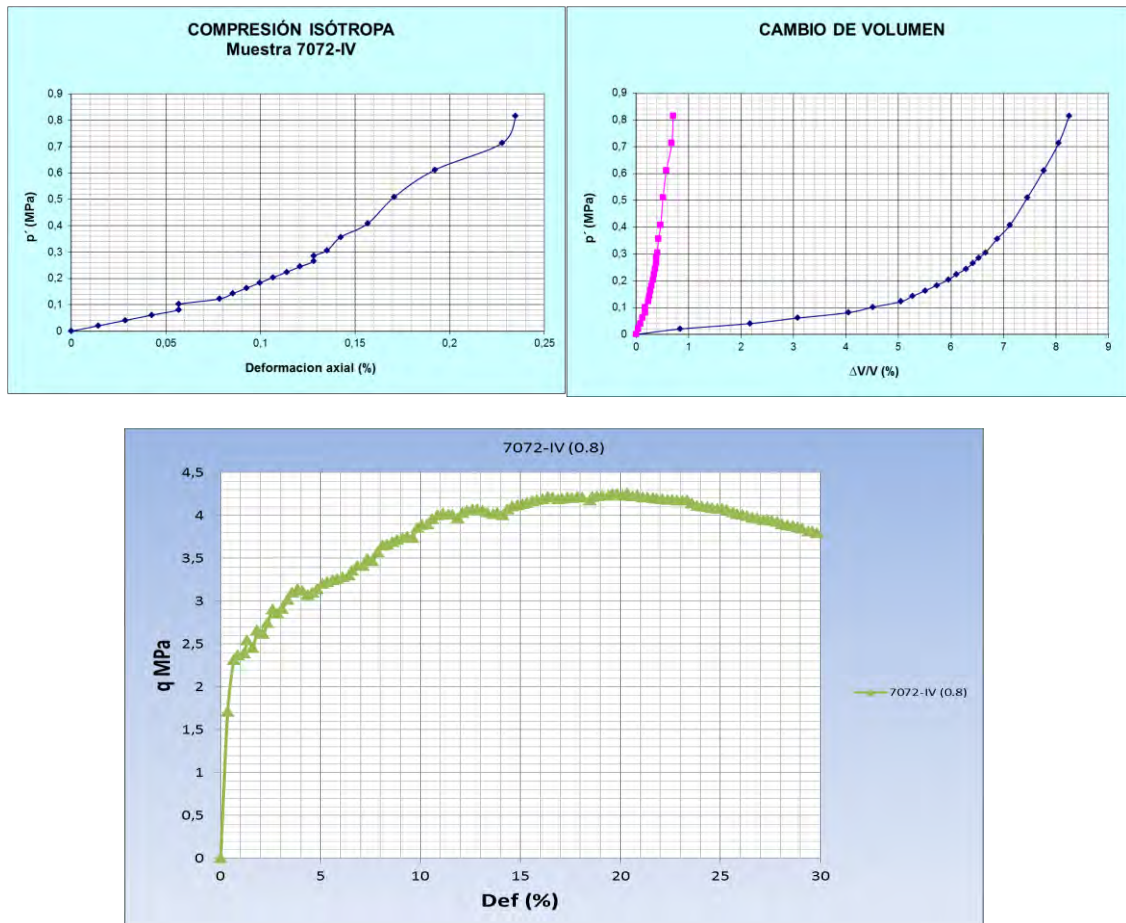


A-1.5.1.3.2.2 Muestra 7072-III.



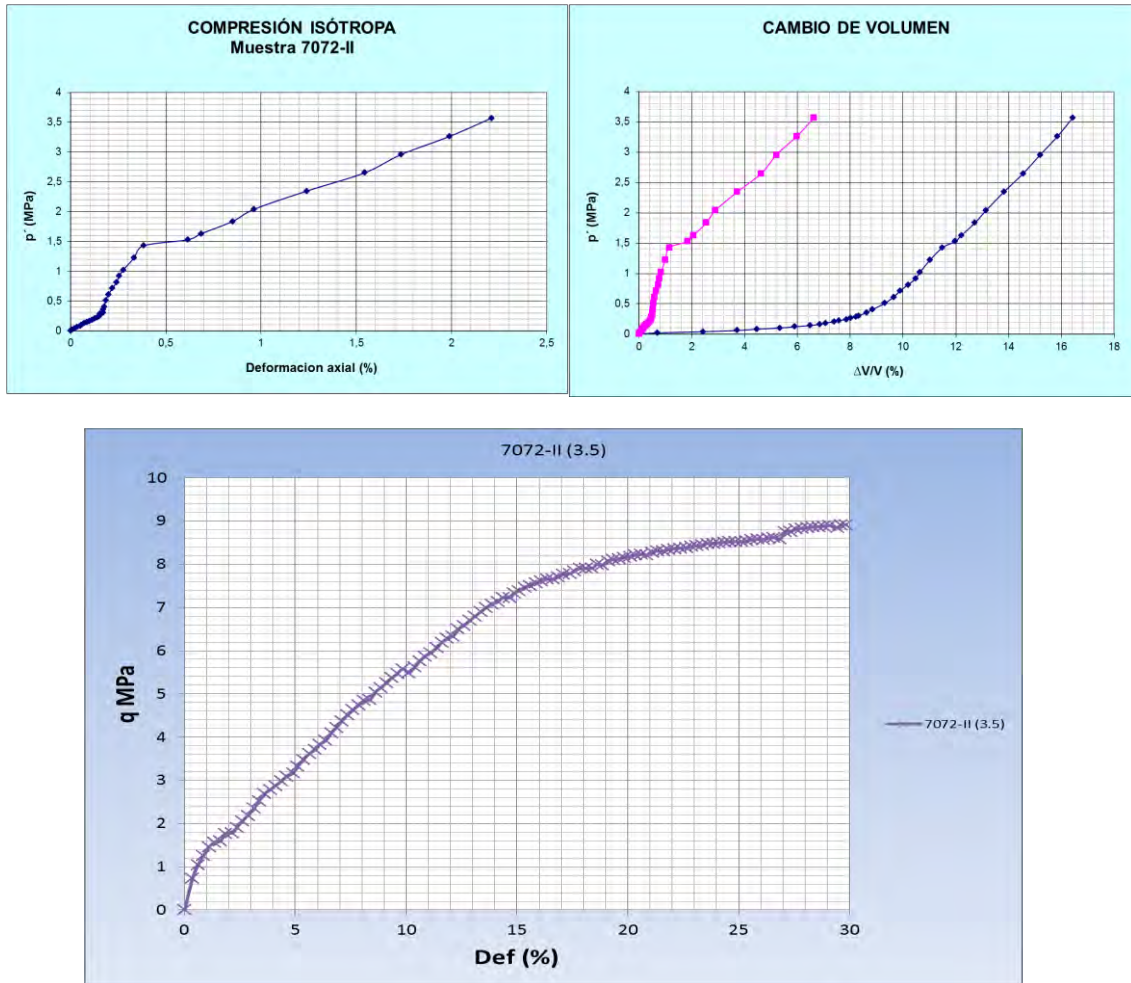
A-1.5.1.3.2.3 Muestra 7072-IV.

$$\gamma = 10.93 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.3.2.4 Muestra 7072-II.

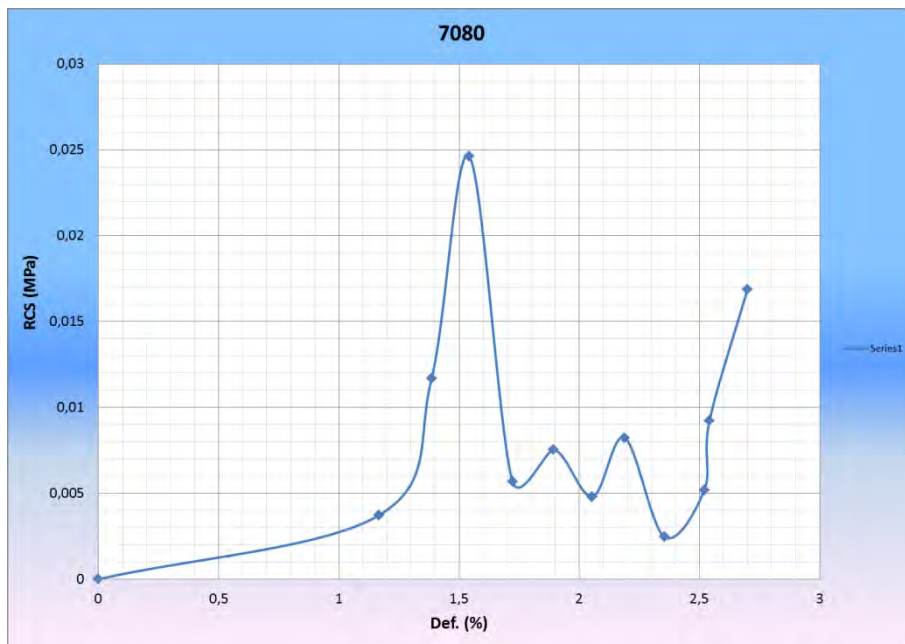
$$\gamma = 11.10 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.4 LPT. M-7073.



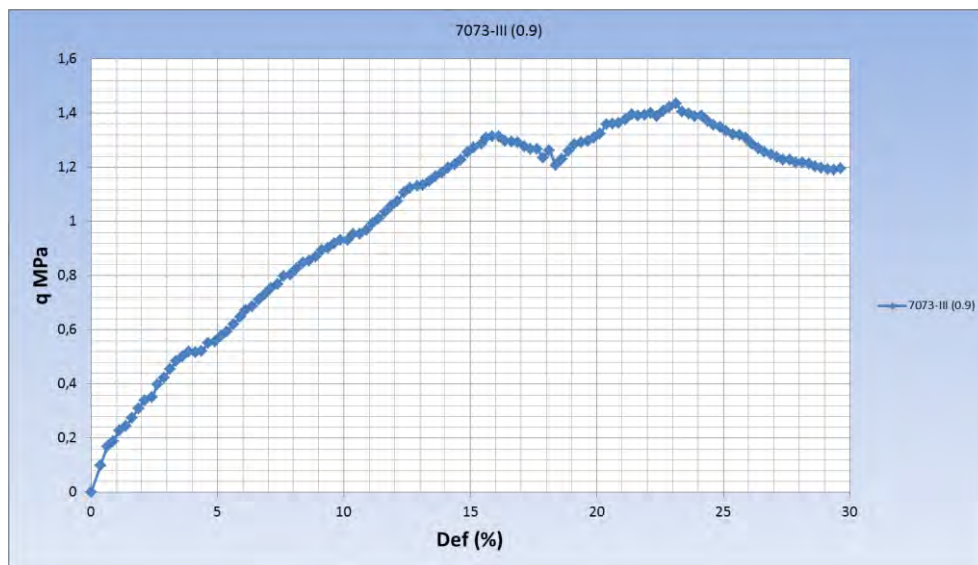
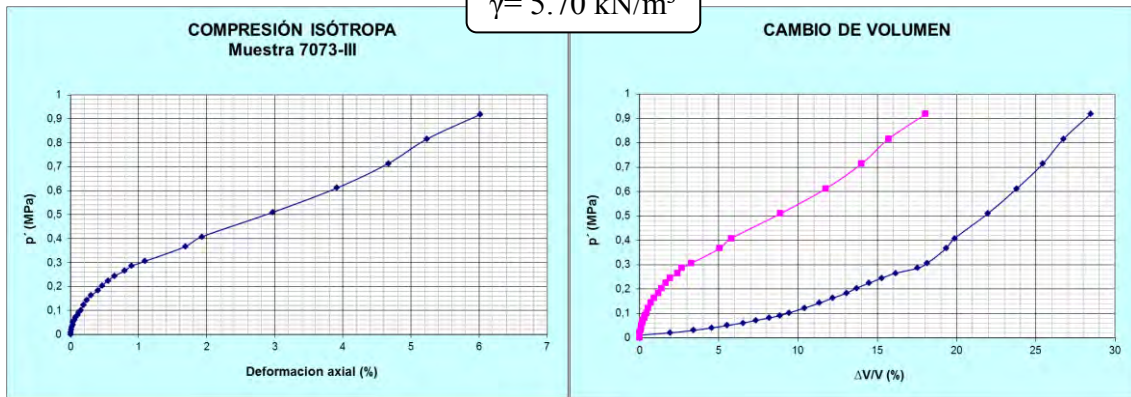
A-1.5.1.4.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.4.2 ENSAYO CI + TIS.

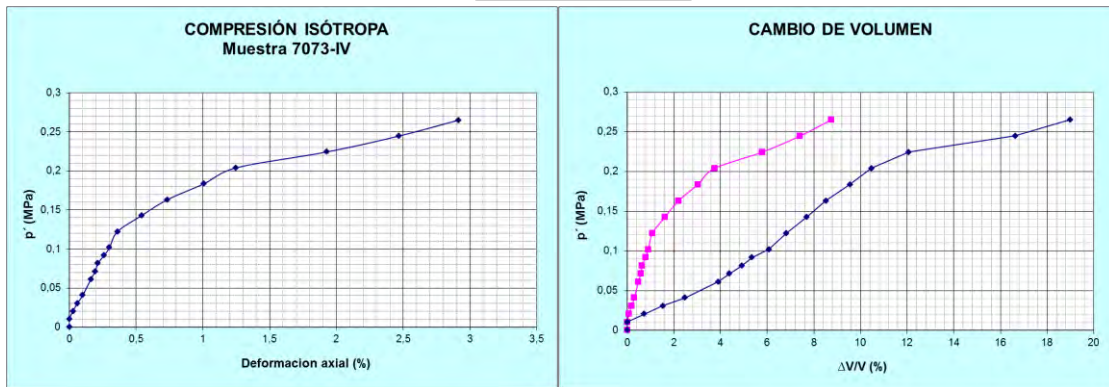
A-1.5.1.4.2.1 Muestra 7073-III.

$$\gamma = 5.70 \text{ kN/m}^3$$



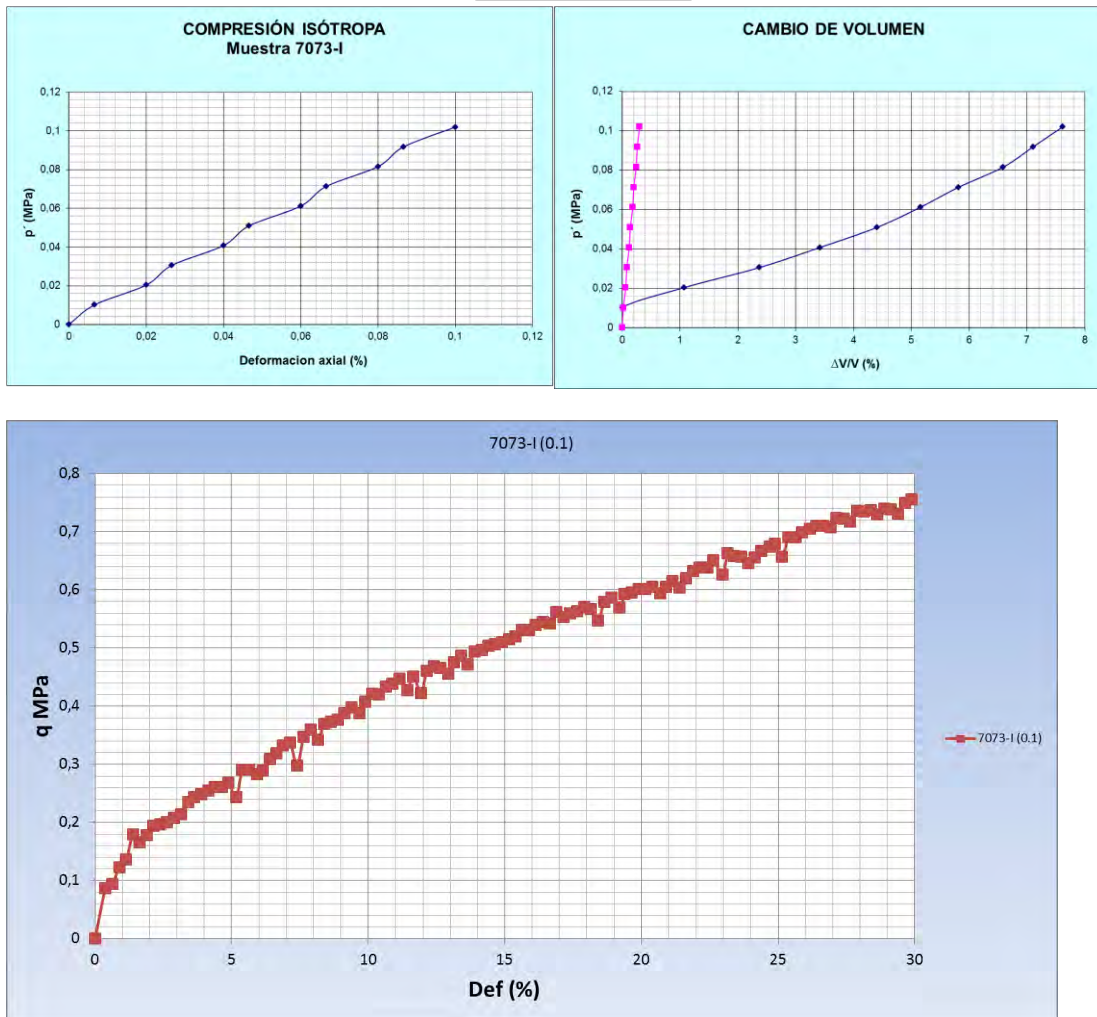
A-1.5.1.4.2.2 Muestra 7073-IV.

$$\gamma = 5.56 \text{ kN/m}^3$$



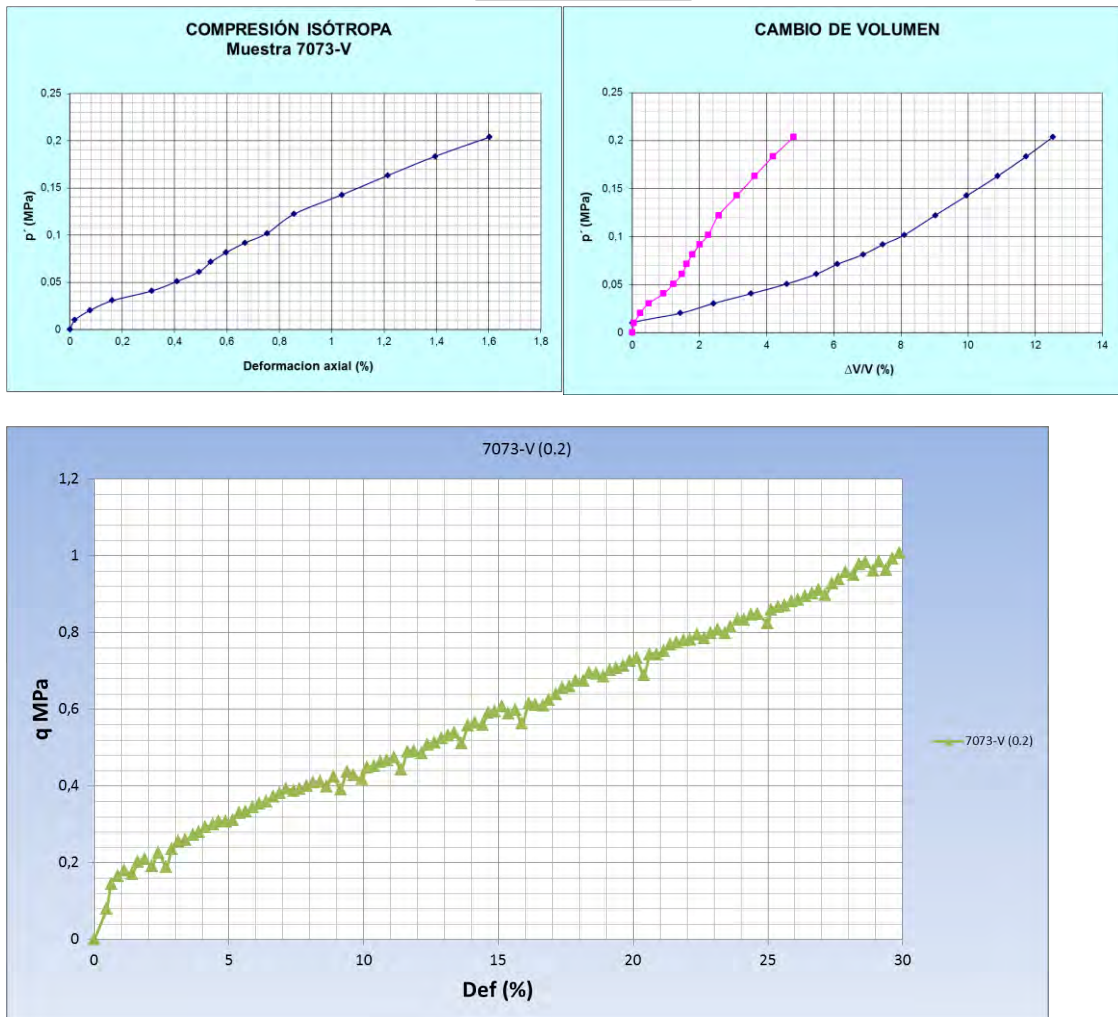
A-1.5.1.4.2.3 Muestra 7073-I.

$$\gamma = 5.37 \text{ kN/m}^3$$



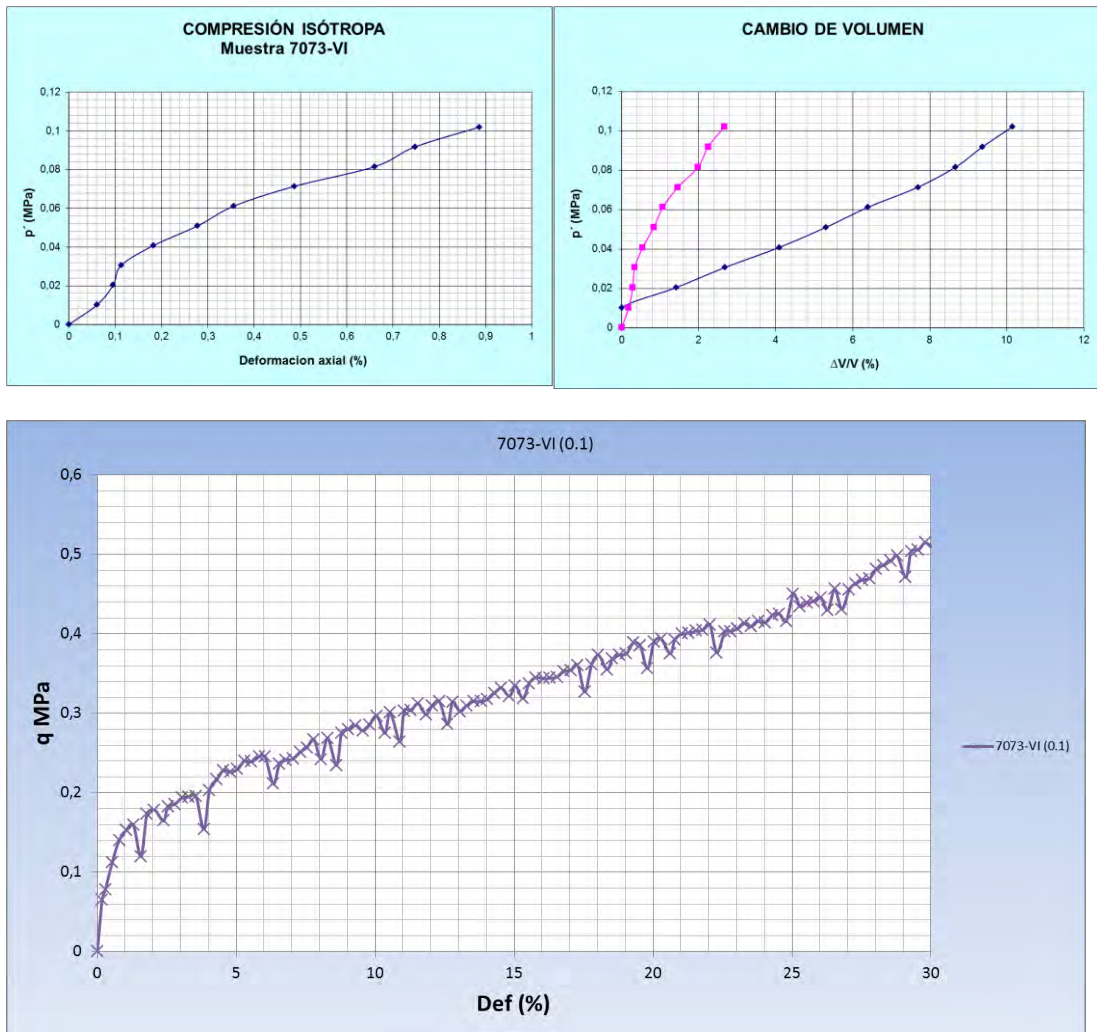
A-1.5.1.4.2.4 Muestra 7073-V.

$$\gamma = 5.83 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.4.2.5 Muestra 7073-VI.

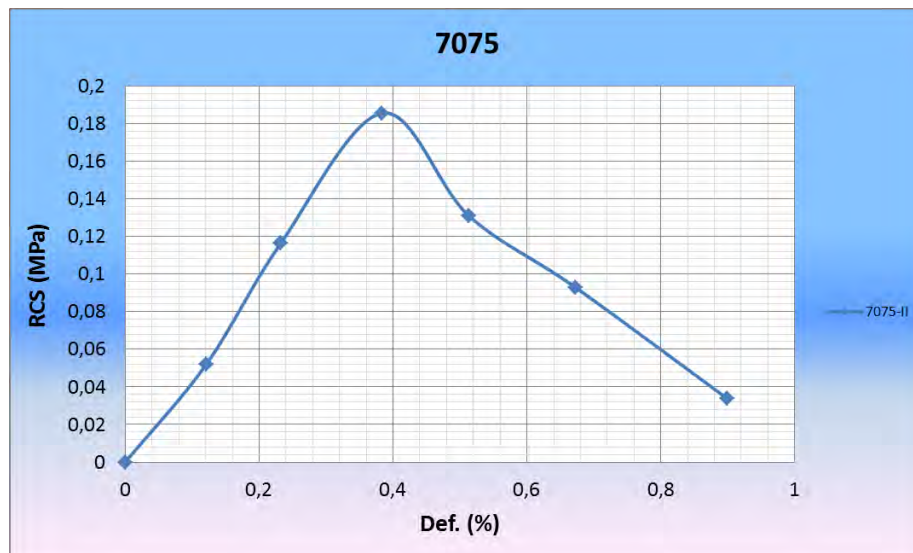
$$\gamma = 5.65 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.5 LPT. M-7075.



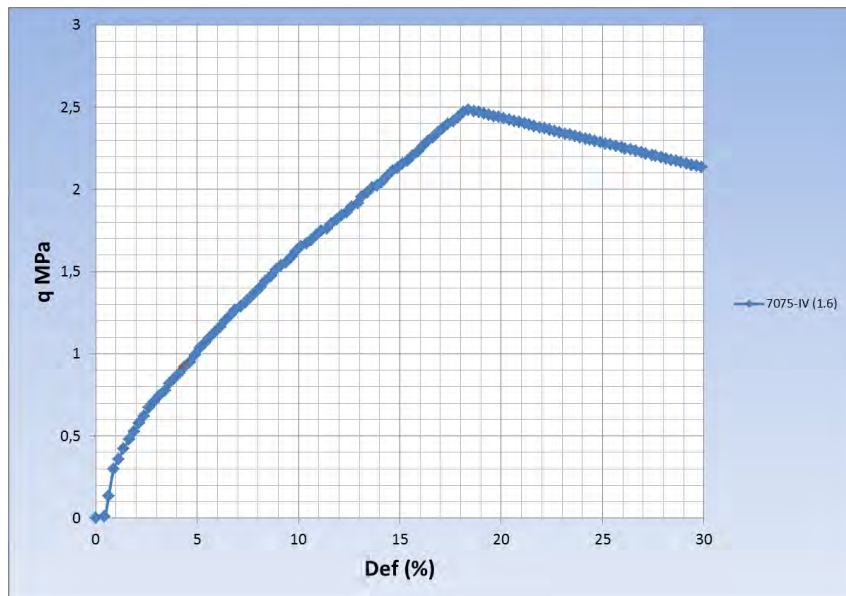
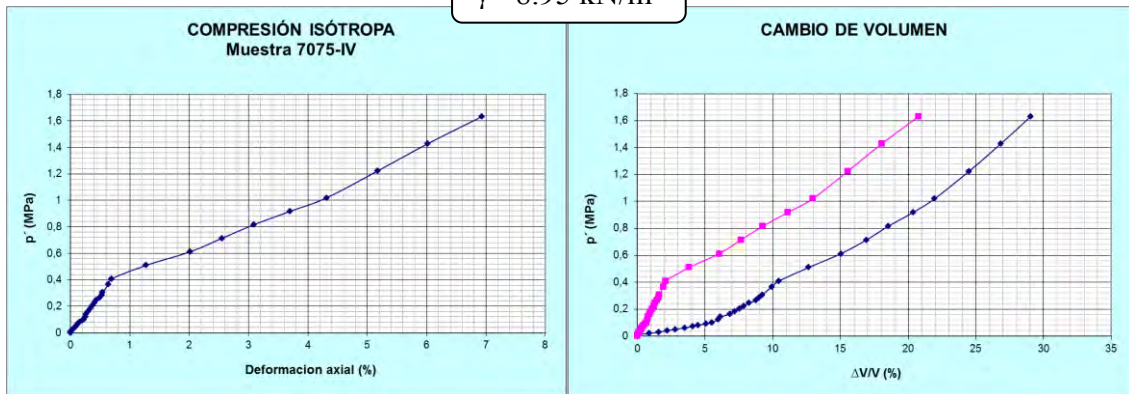
A-1.5.1.5.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.5.2 ENSAYO CI + TIS

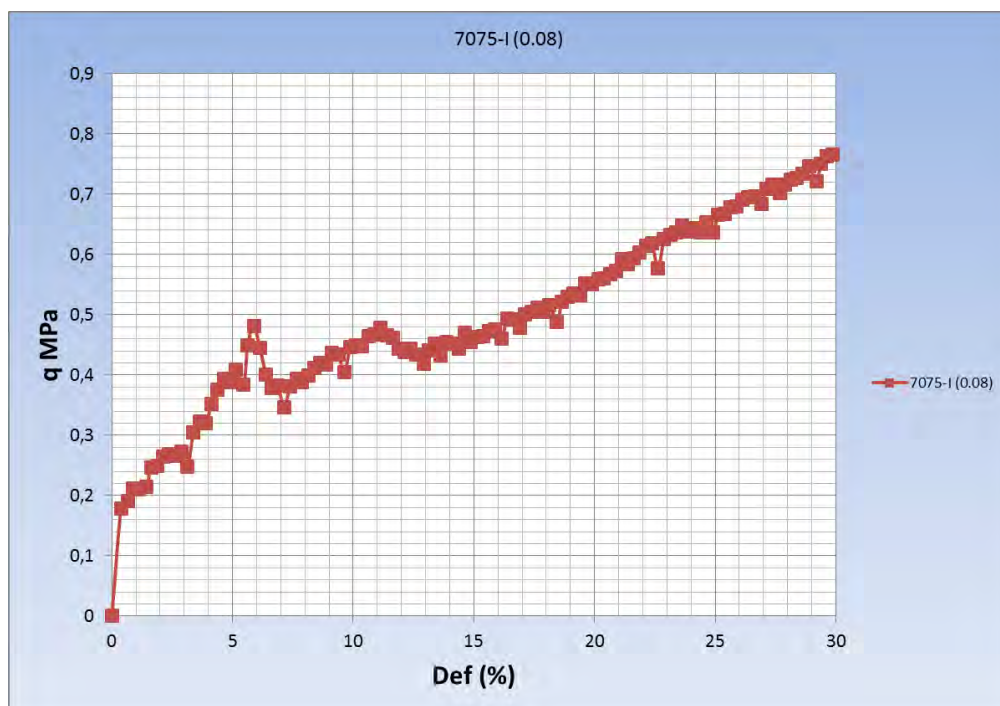
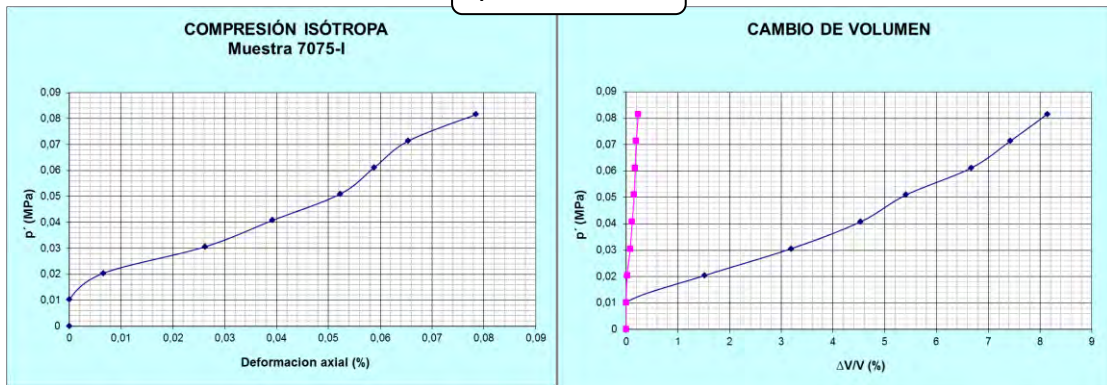
A-1.5.1.5.2.1 Muestra 7075-IV

$$\gamma = 8.95 \text{ kN/m}^3$$



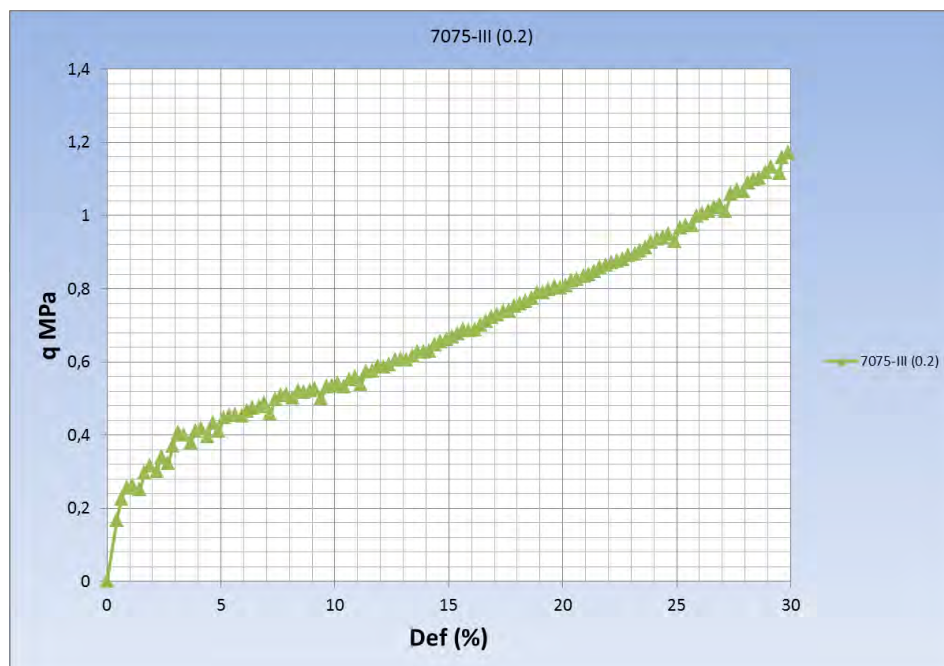
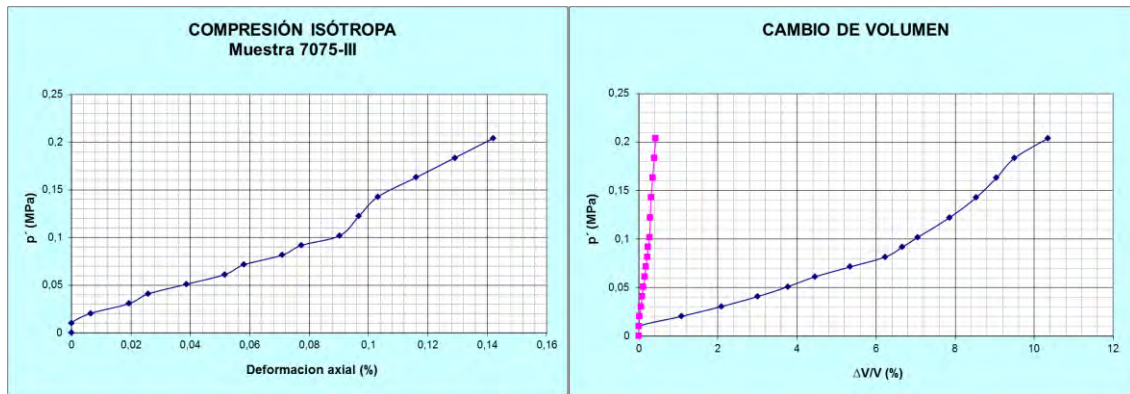
A-1.5.1.5.2.2 Muestra 7075-I.

$$\gamma = 8.95 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.5.2.3 Muestra 7075-I.

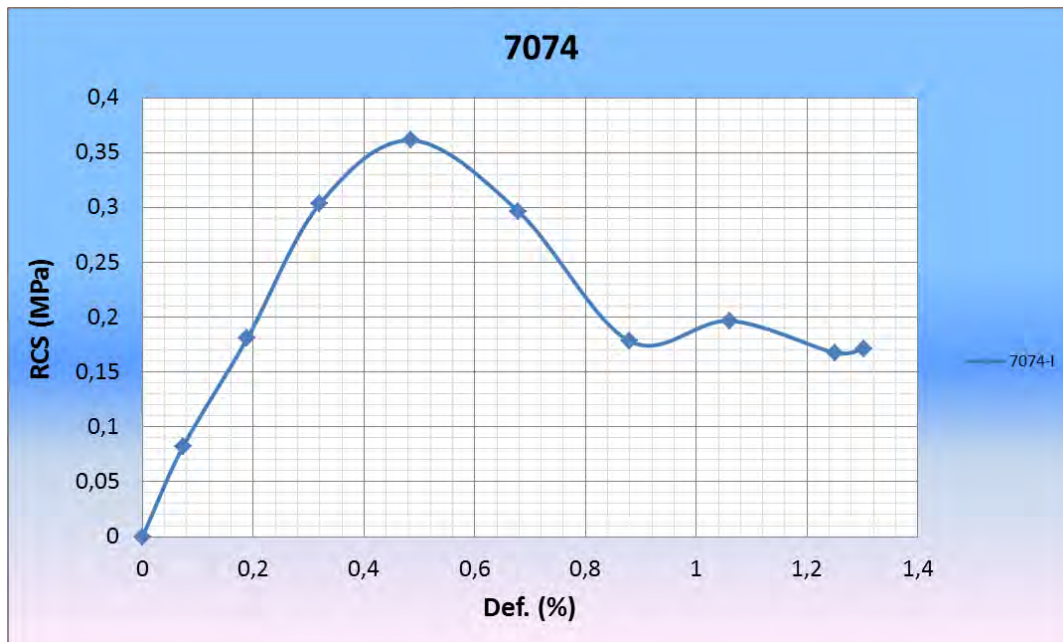
$$\gamma = 8.58 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.6 LPT. M-7074.



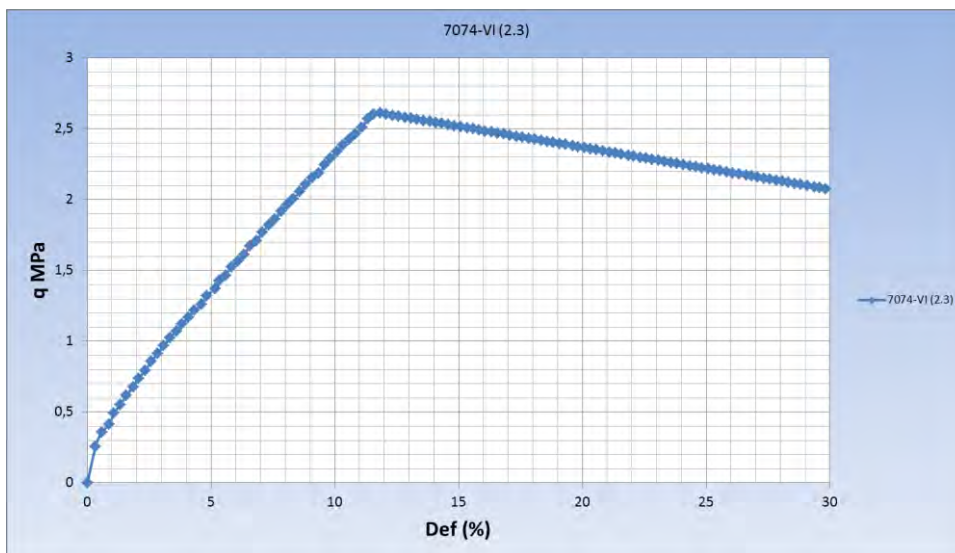
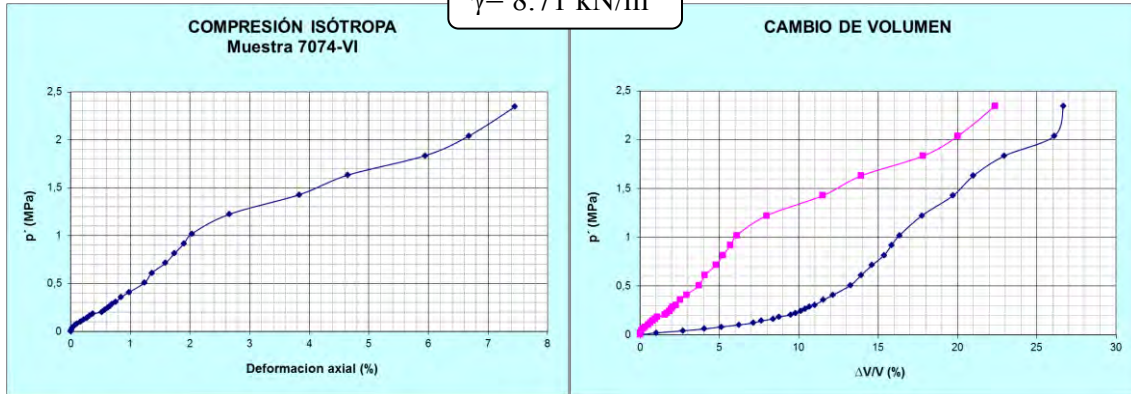
A-1.5.1.6.1 ENSAYO CSP.



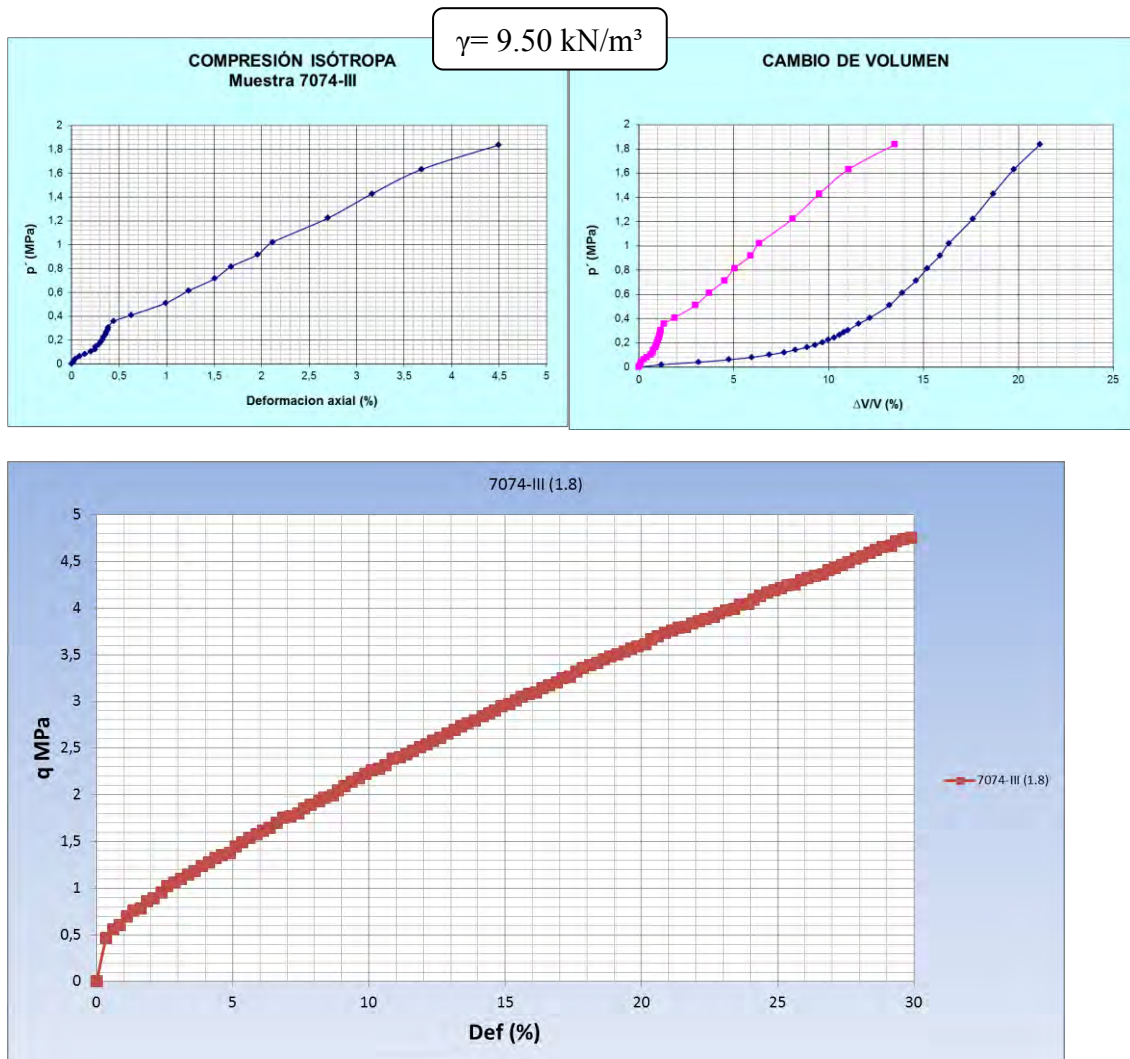
A-1.5.1.6.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.6.2.1 Muestra 7074-VI.

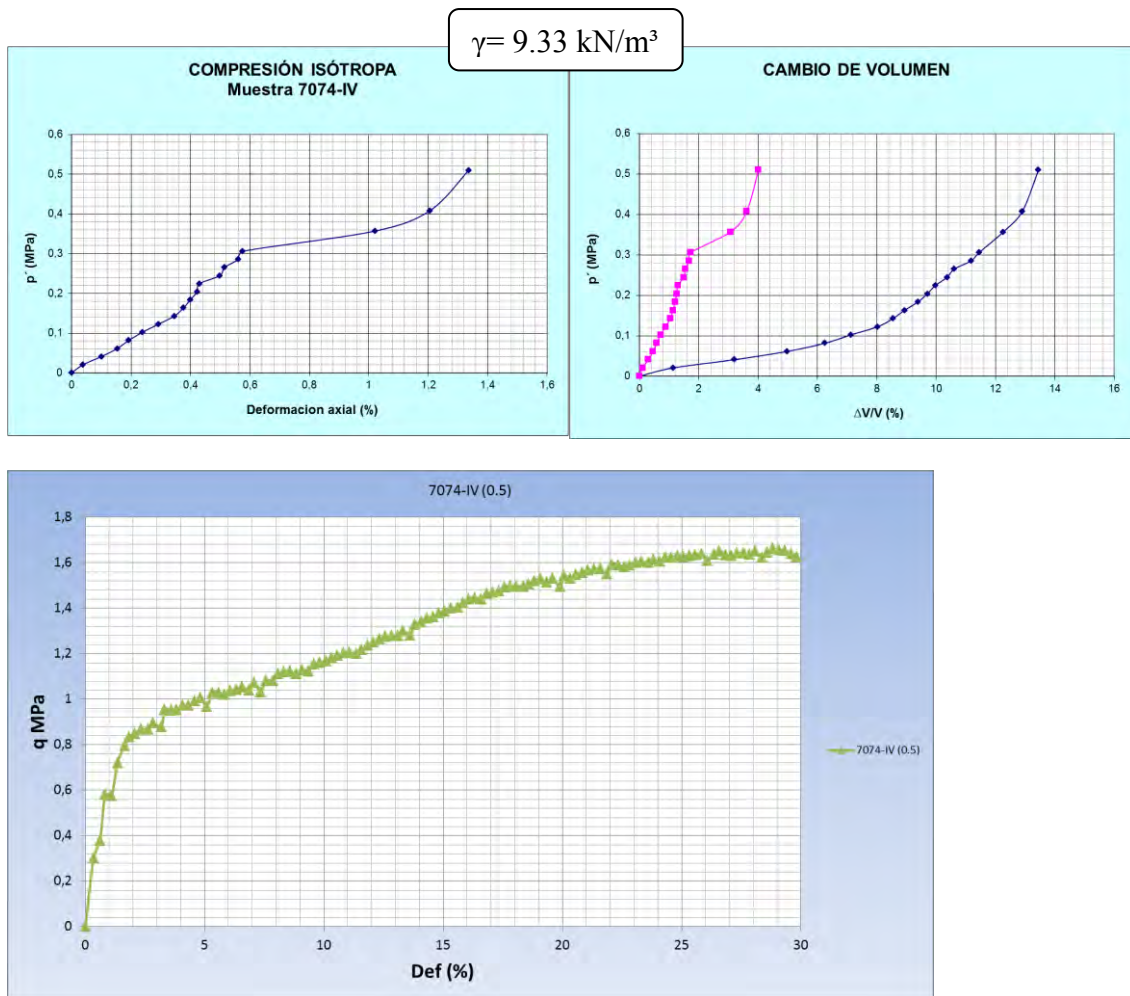
$$\gamma = 8.71 \text{ kN/m}^3$$



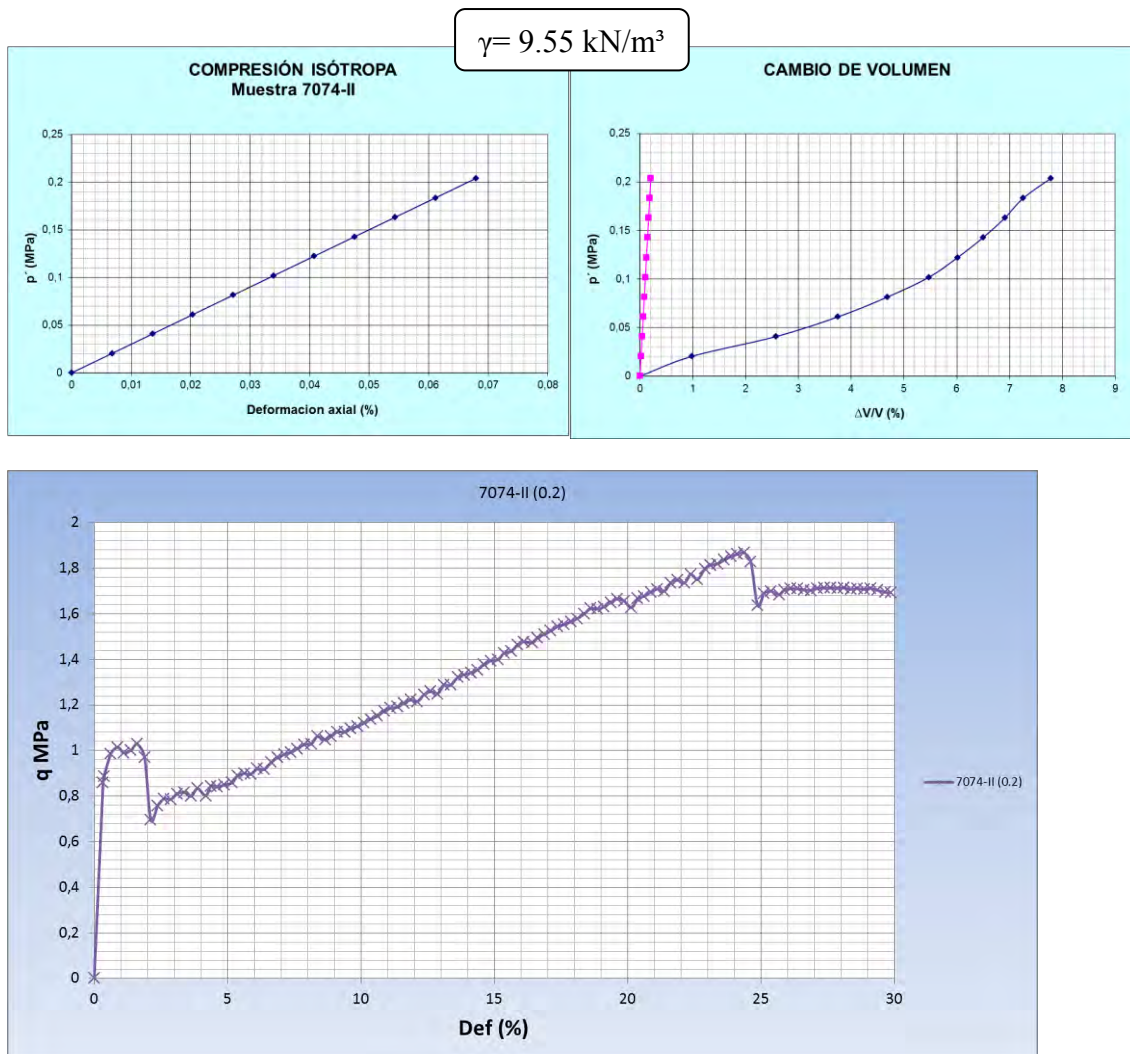
A-1.5.1.6.2.2 Muestra 7074-III.



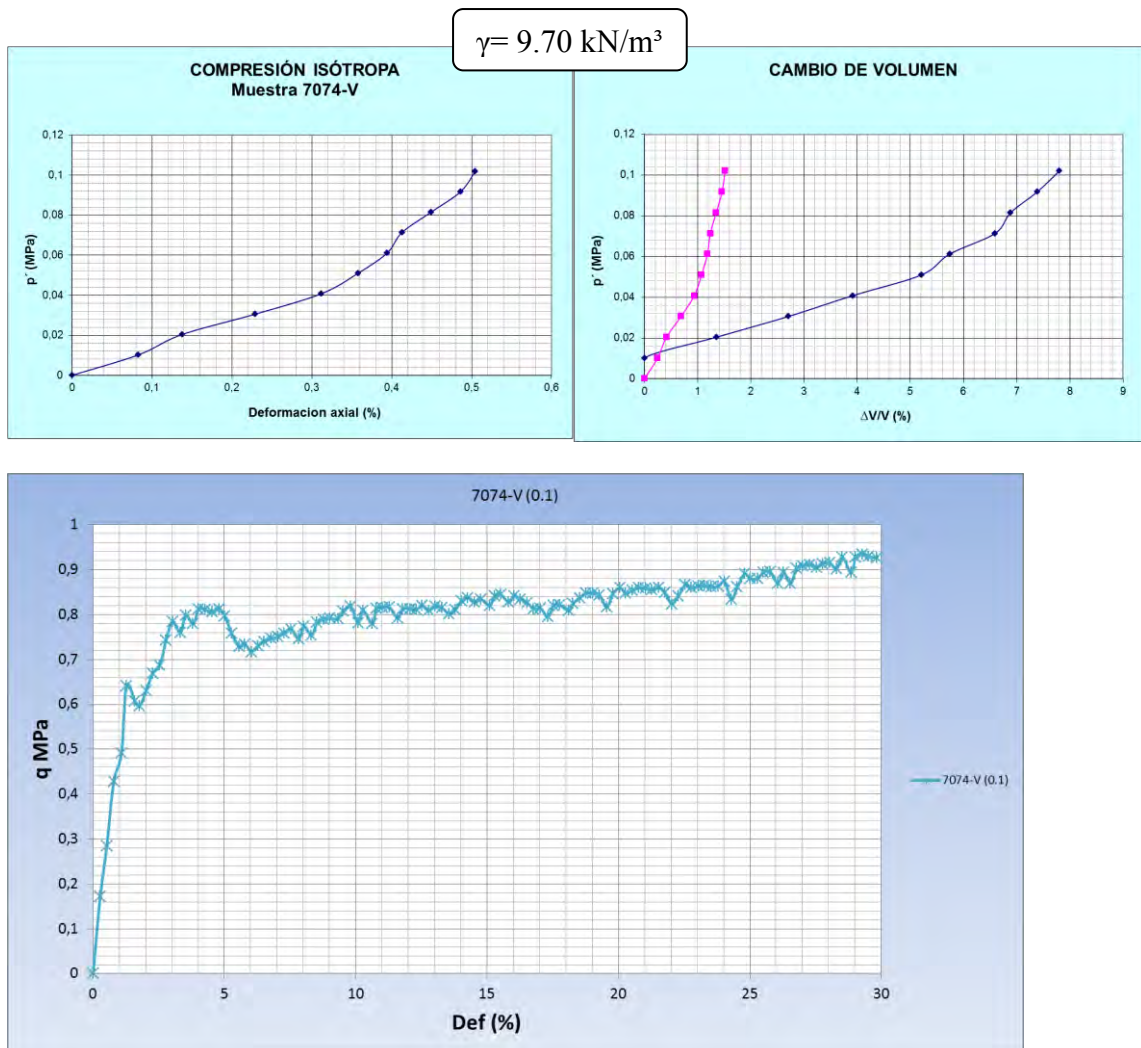
A-1.5.1.6.2.3 Muestra 7074-IV.



A-1.5.1.6.2.4 Muestra 7074-IV.



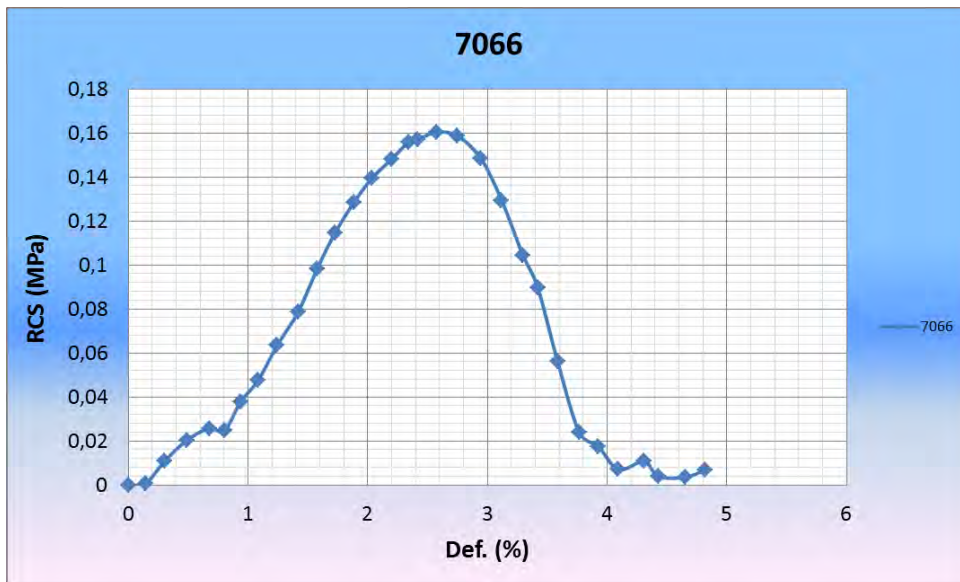
A-1.5.1.6.2.5 Muestra 7074-V.



A-1.5.1.7 LPT. M-7066.

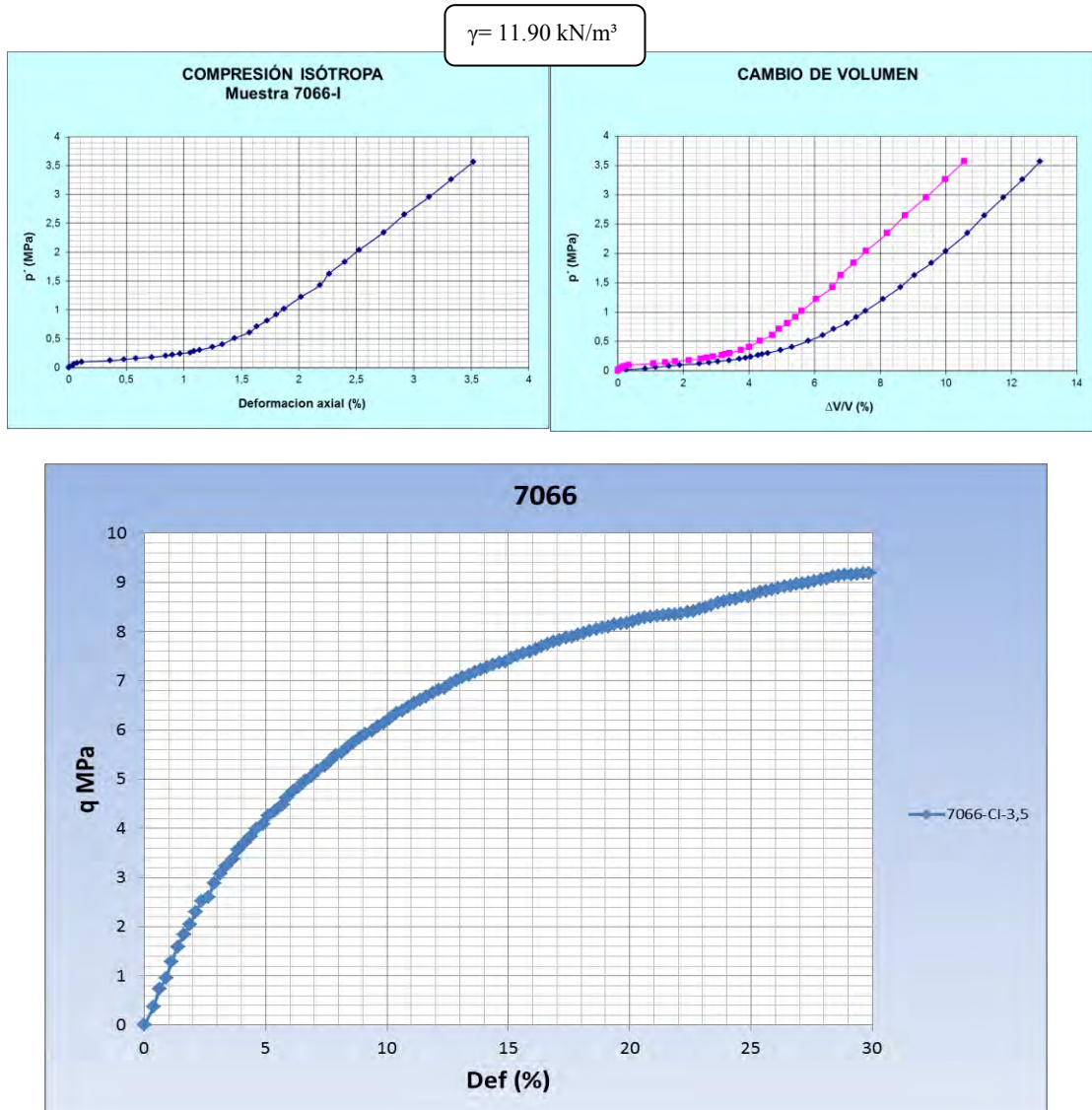


A-1.5.1.7.1 ENSAYO CSP.

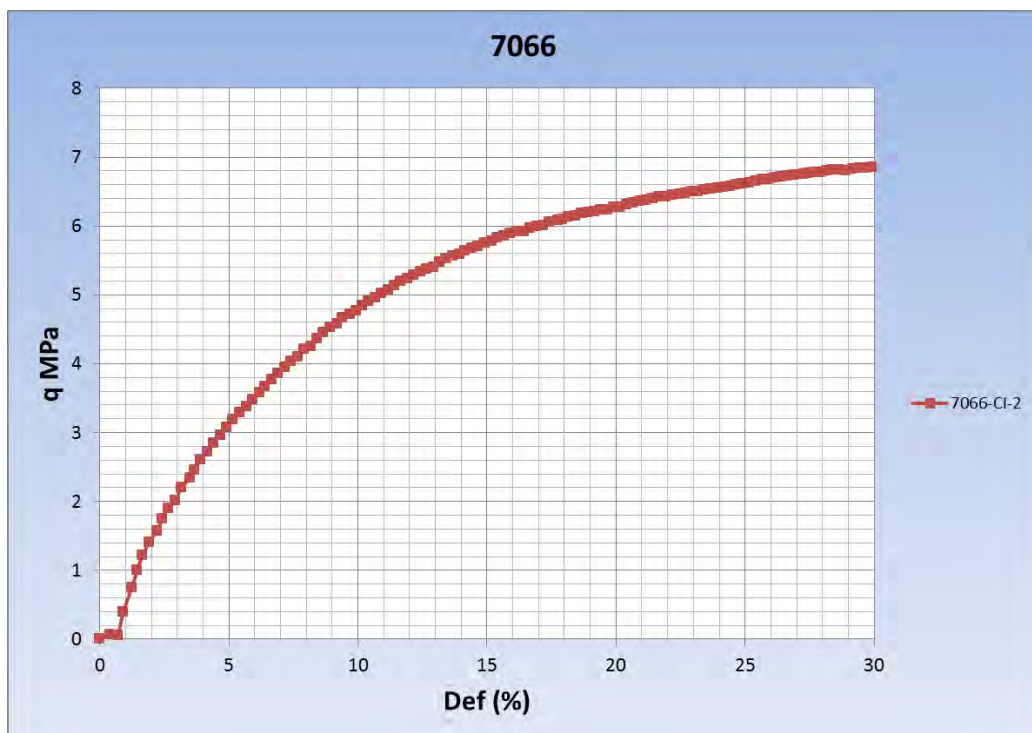
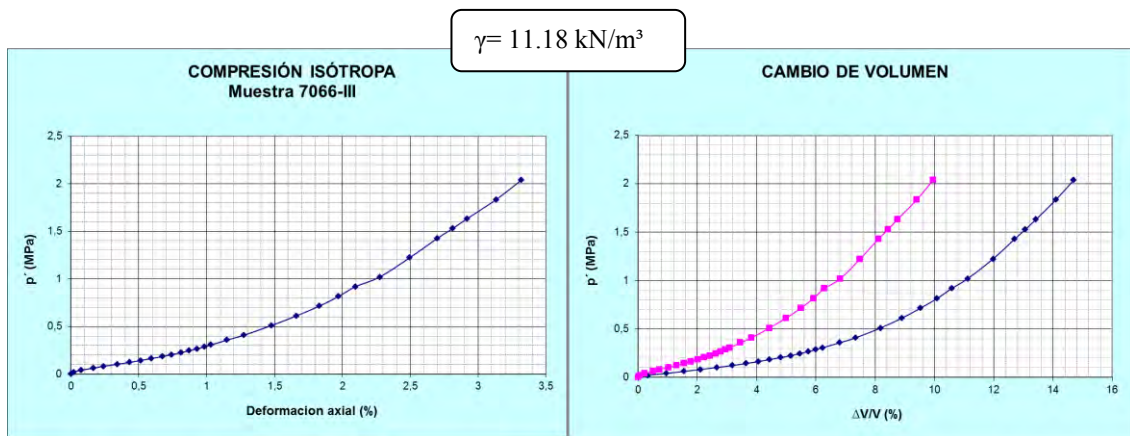


A-1.5.1.7.2 ENSAYO CI + TIS.

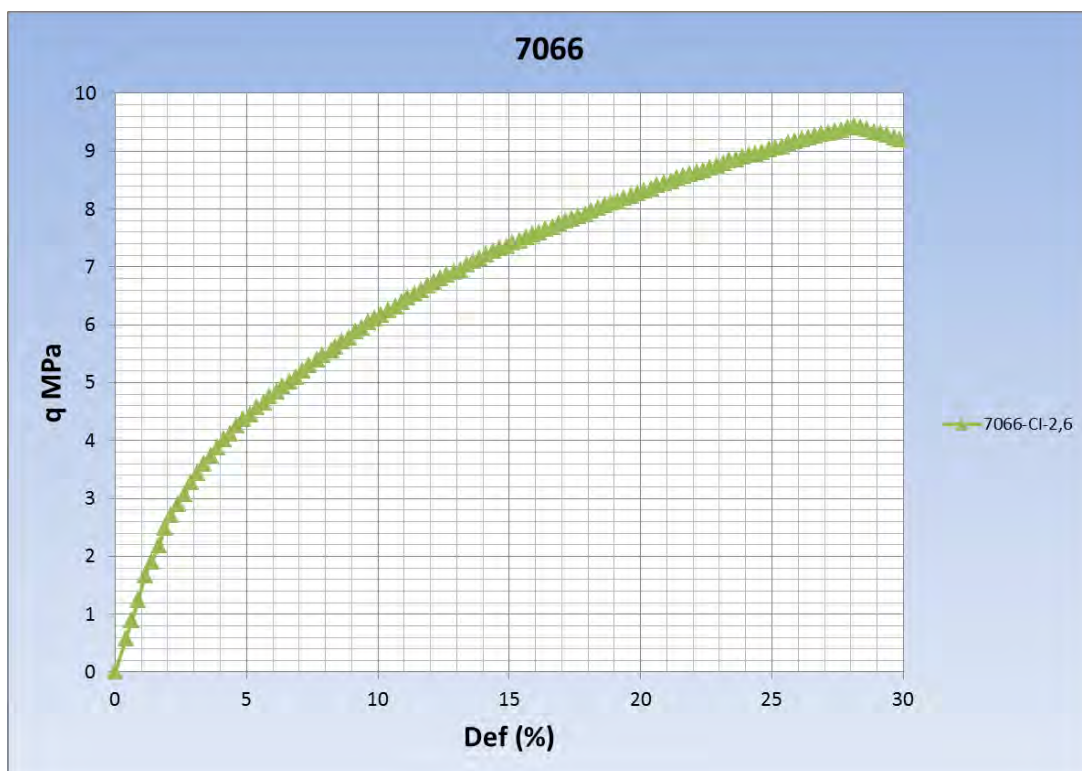
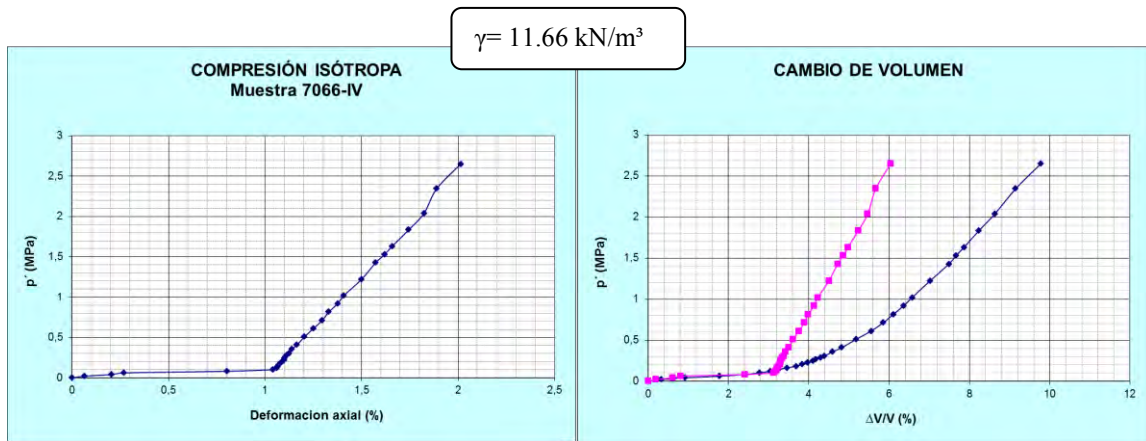
A-1.5.1.7.2.1 Muestra 7066-I.



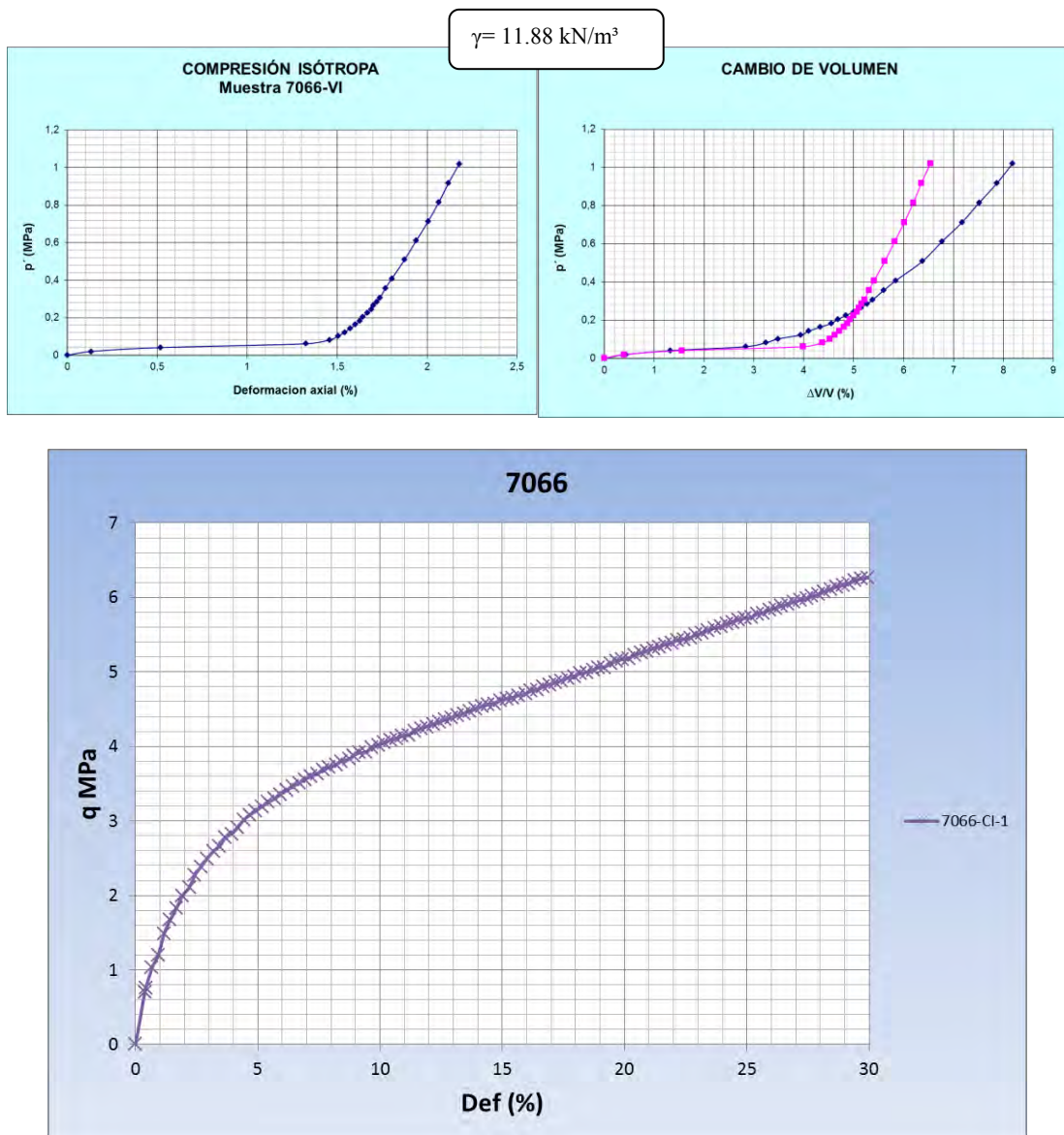
A-1.5.1.7.2.2 Muestra 7066-III.



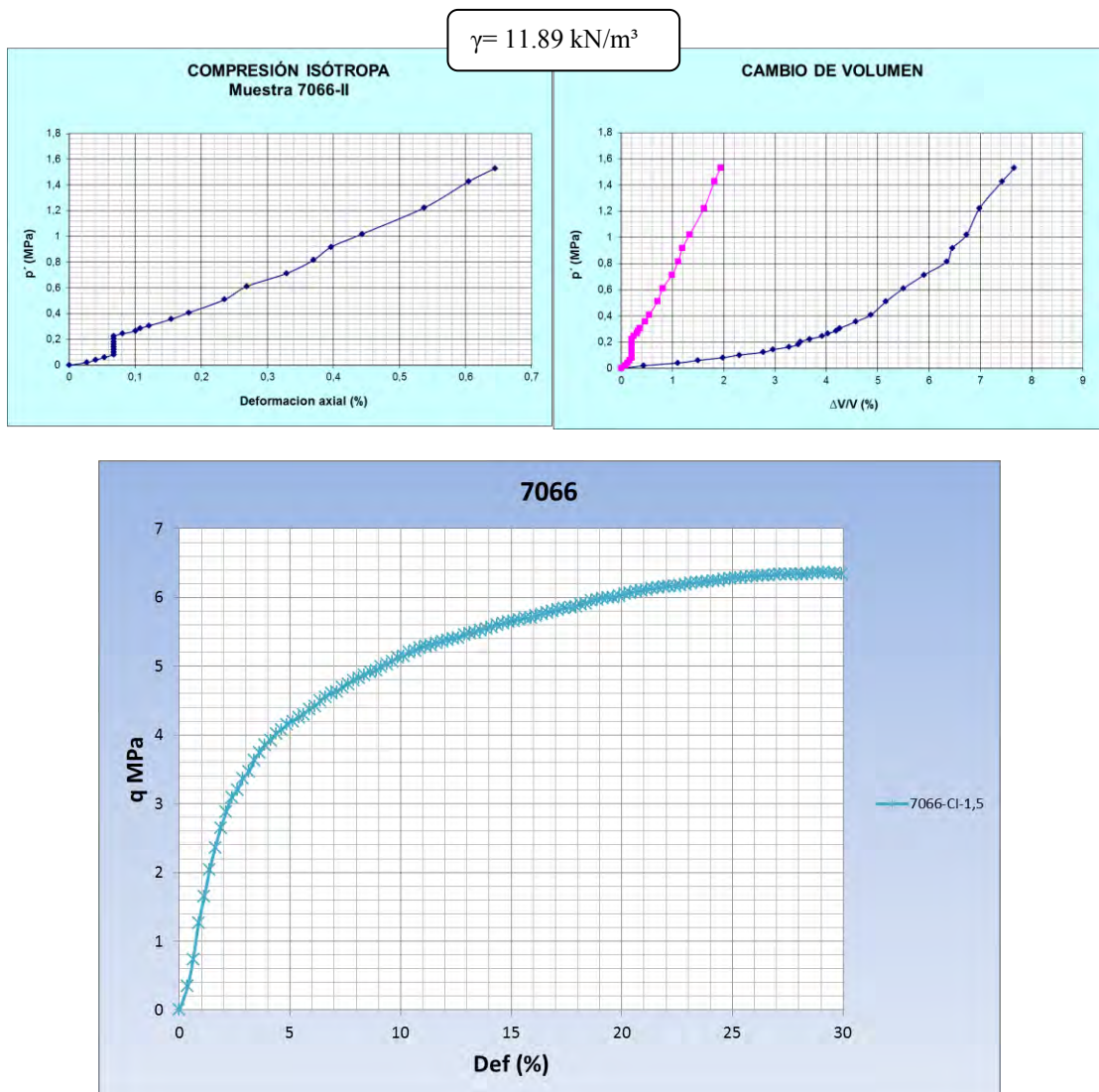
A-1.5.1.7.2.3 Muestra 7066-IV.



A-1.5.1.7.2.4 Muestra 7066-VI.



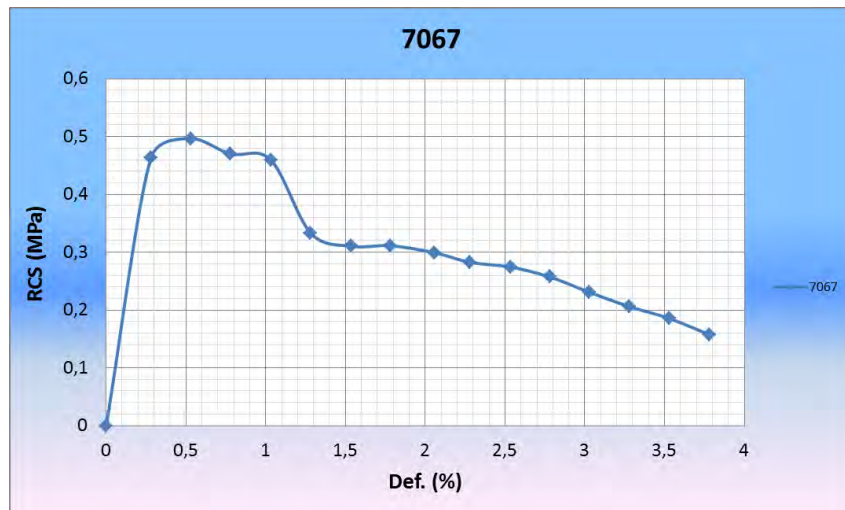
A-1.5.1.7.2.5 Muestra 7066-II.



A-1.5.1.8 LPT. M-7067.

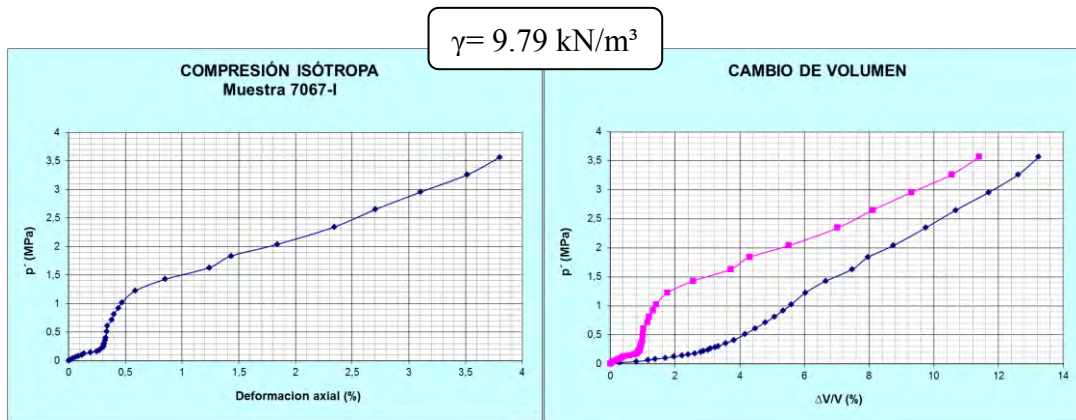


A-1.5.1.8.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.8.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.8.2.1 Muestra 7067-I.

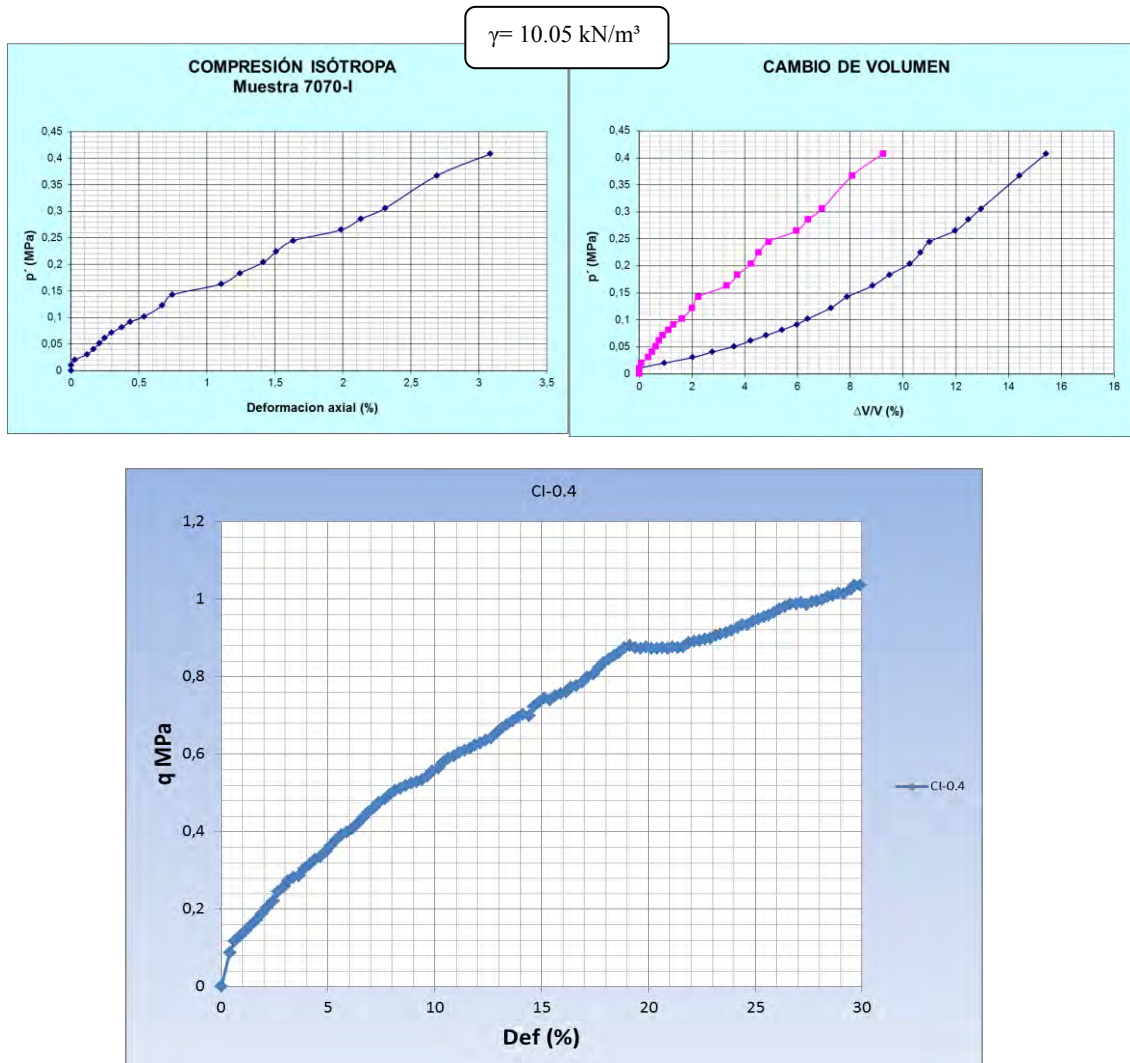


A-1.5.1.8.3 LPT. M-7070.

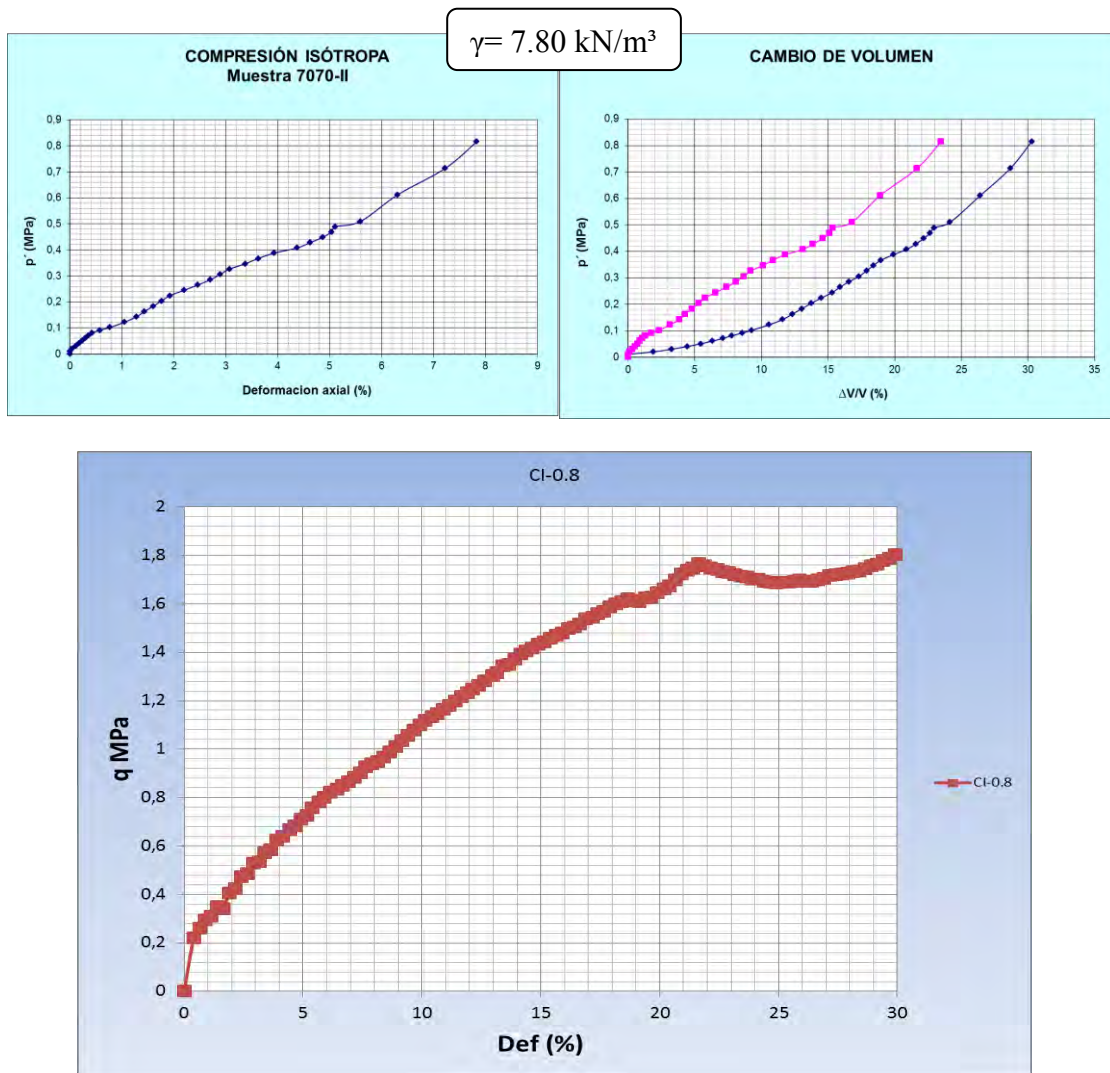


A-1.5.1.8.4 ENSAYO CI + TIS.

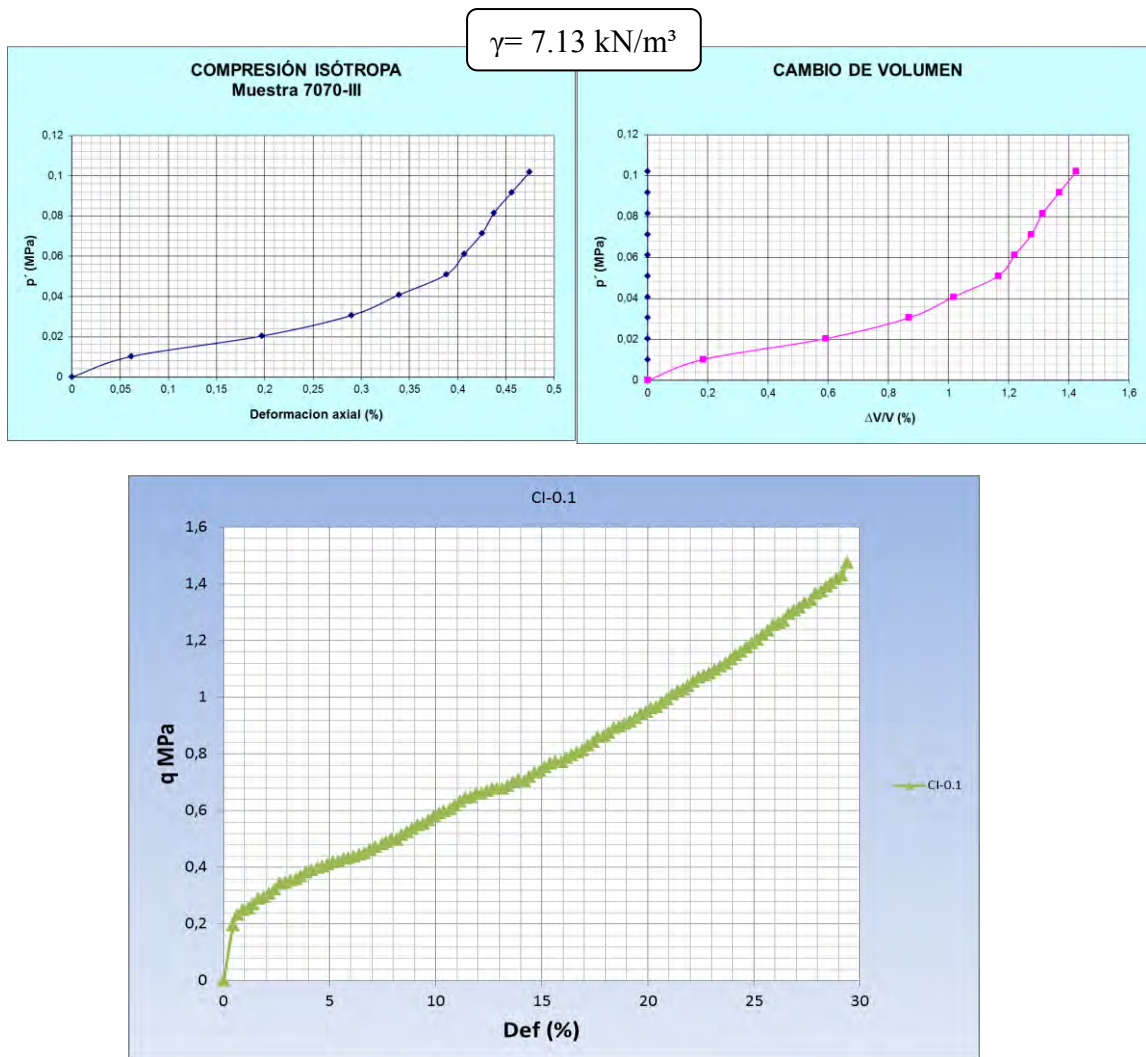
A-1.5.1.8.4.1 Muestra 7070-I.



A-1.5.1.8.4.2 Muestra 7070-II.



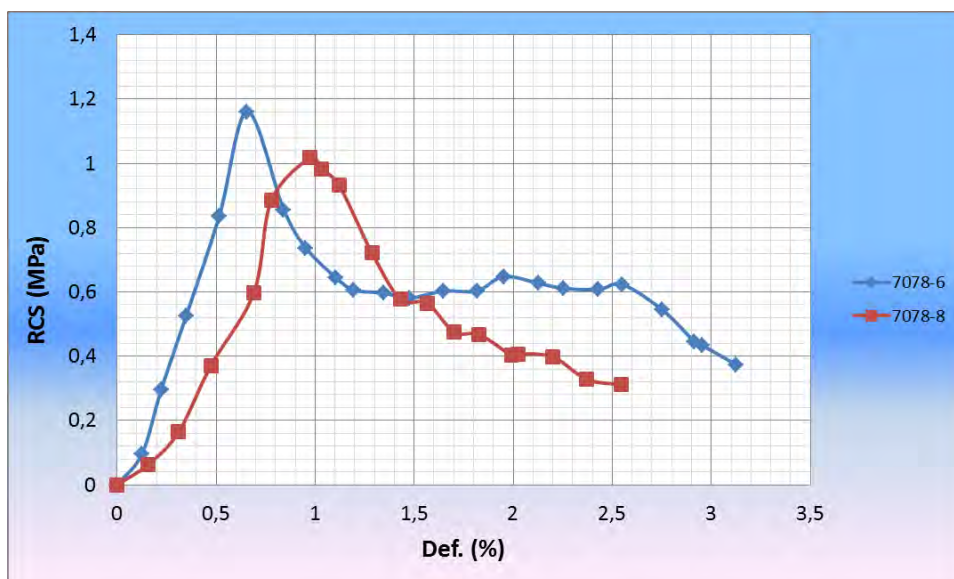
A-1.5.1.8.4.3 Muestra 7070-II.



A-1.5.1.9 LPT. M-7078.

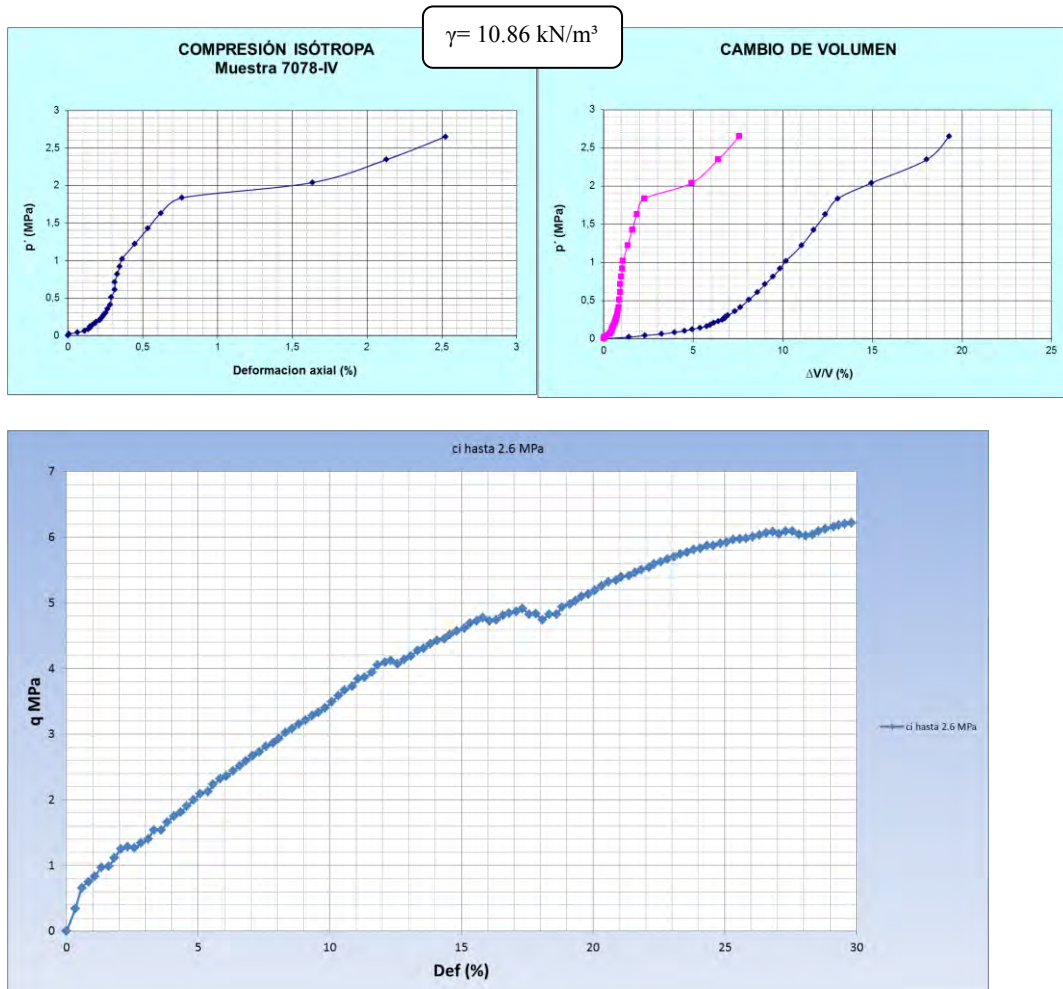


A-1.5.1.9.1 ENSAYO CSP.

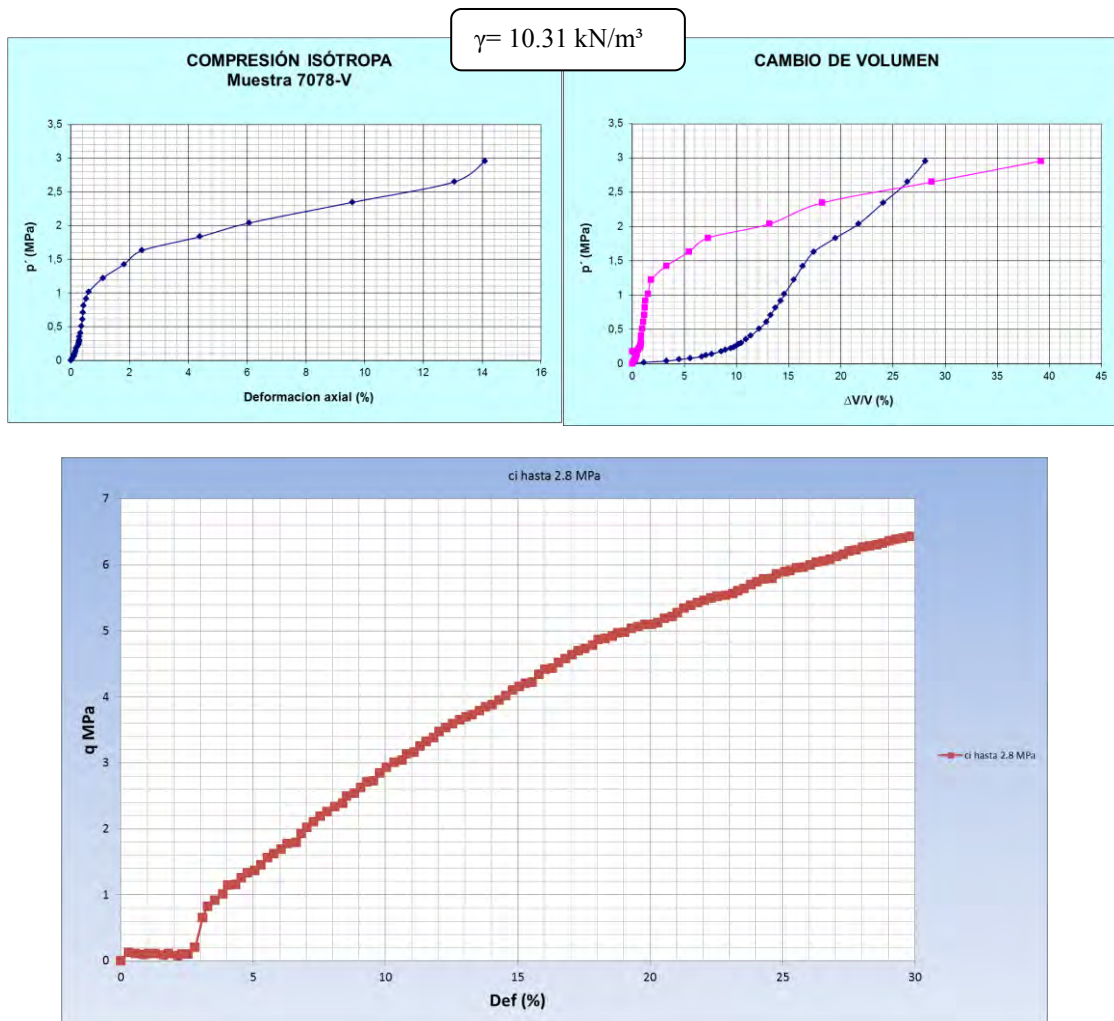


A-1.5.1.9.2 ENSAYO CI + TIS.

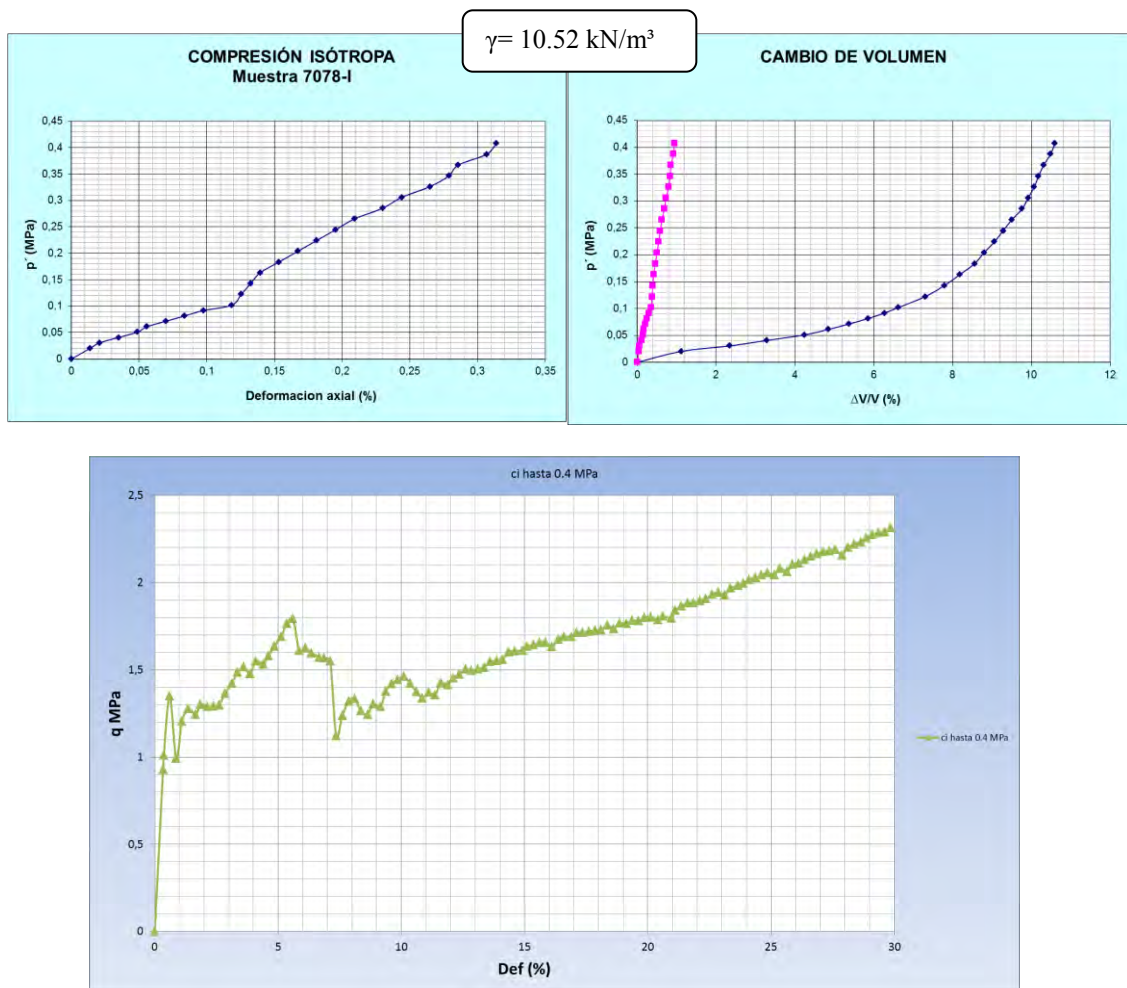
A-1.5.1.9.2.1 Muestra 7078-IV.



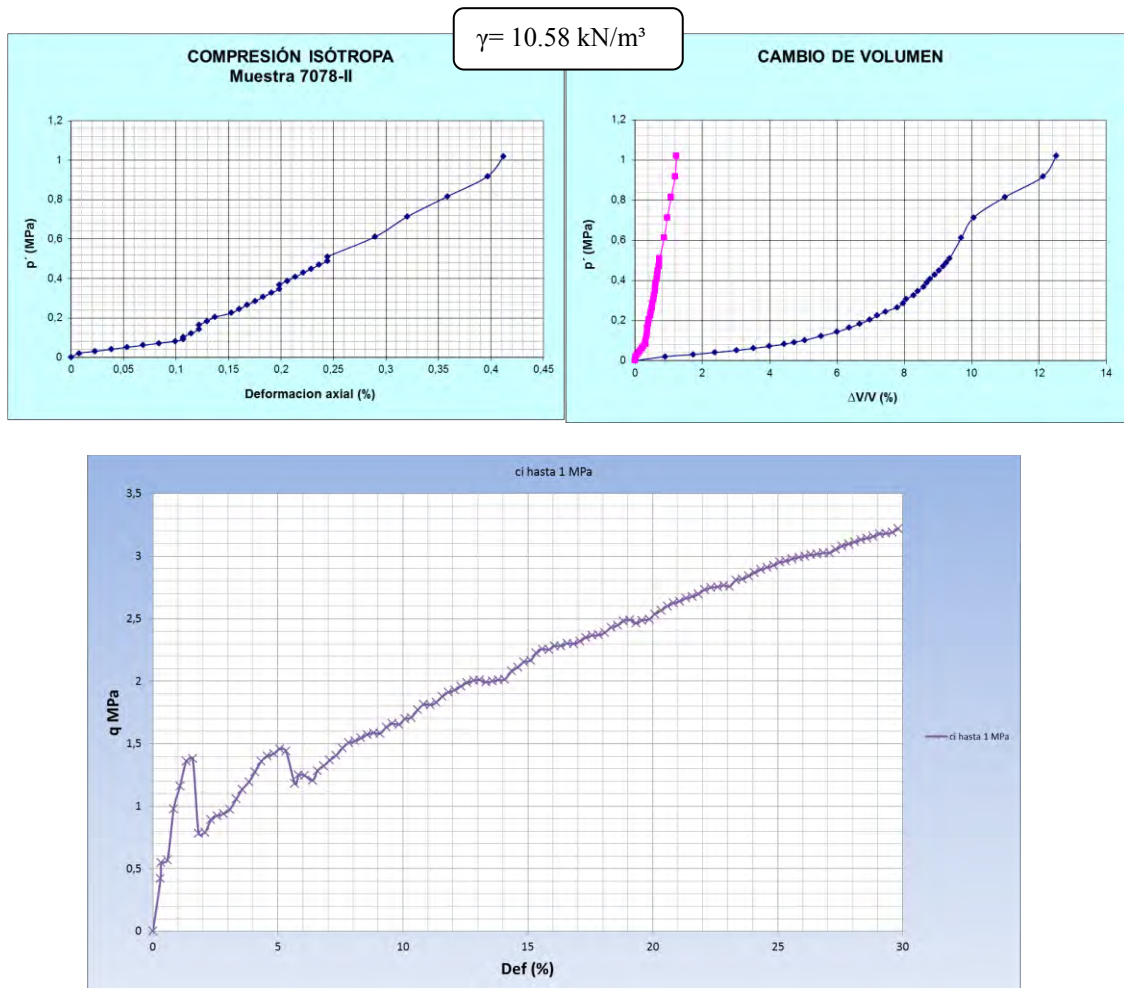
A-1.5.1.9.2.2 Muestra 7078-V.



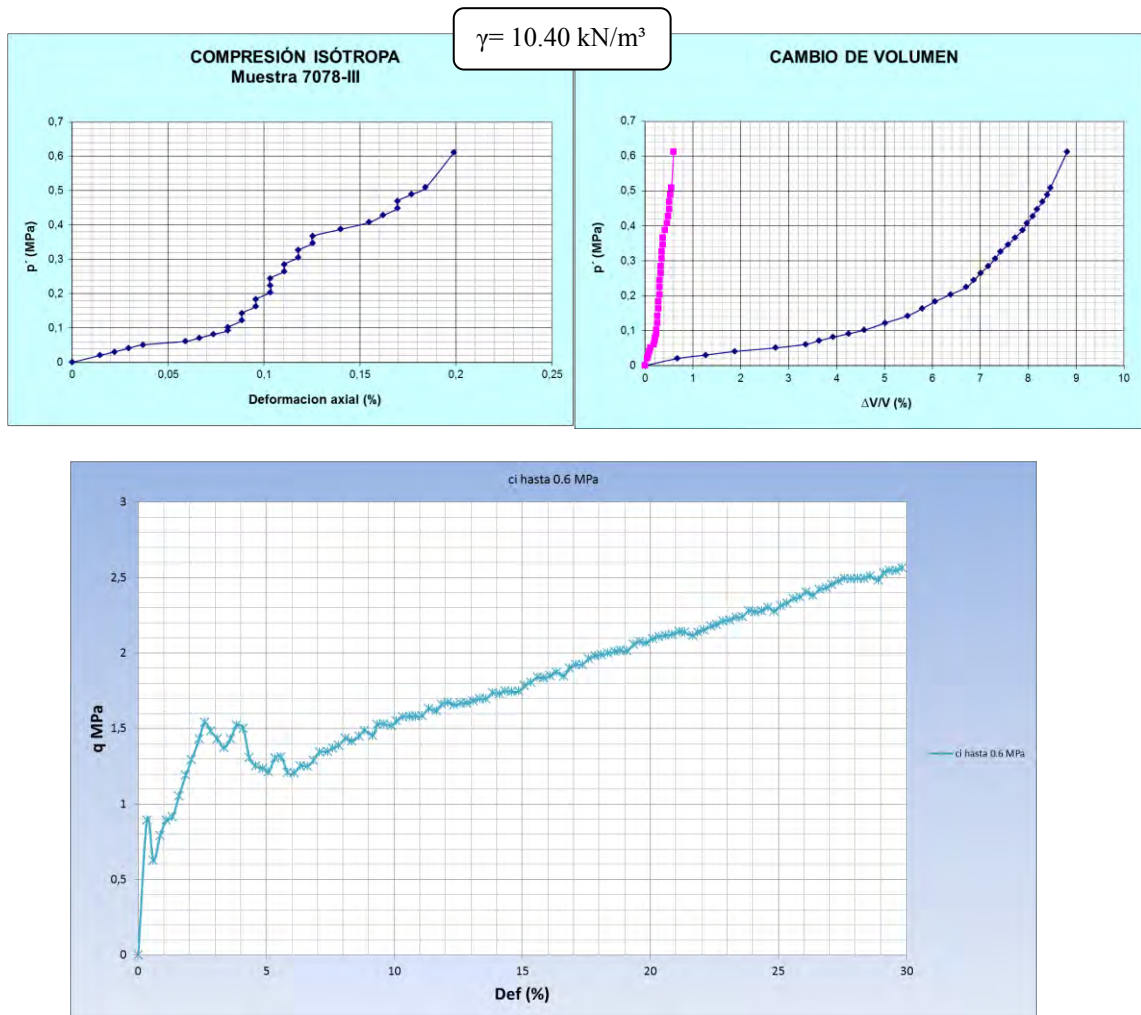
A-1.5.1.9.2.3 Muestra 7078-I.



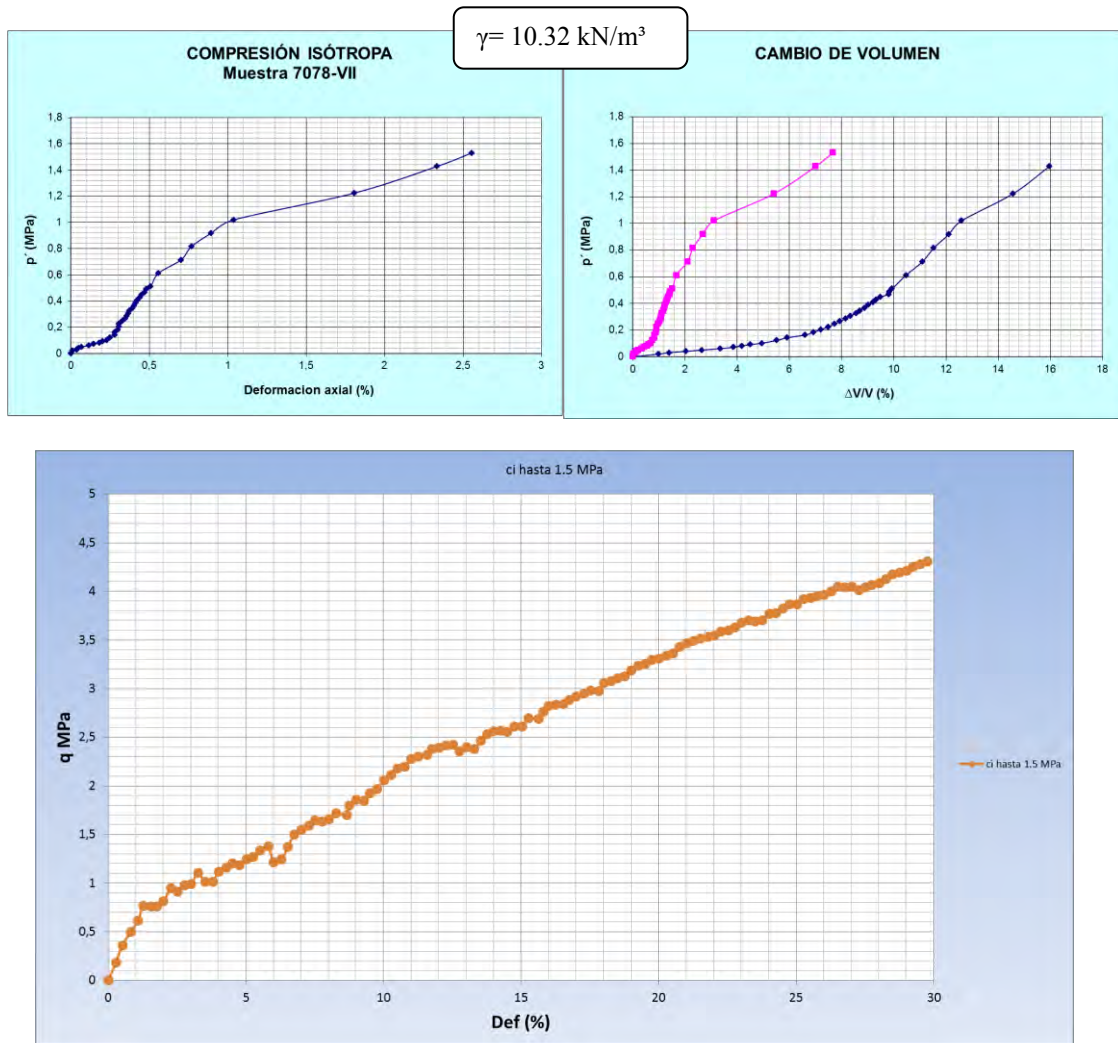
A-1.5.1.9.2.4 Muestra 7078-II.



A-1.5.1.9.2.5 Muestra 7078-III.



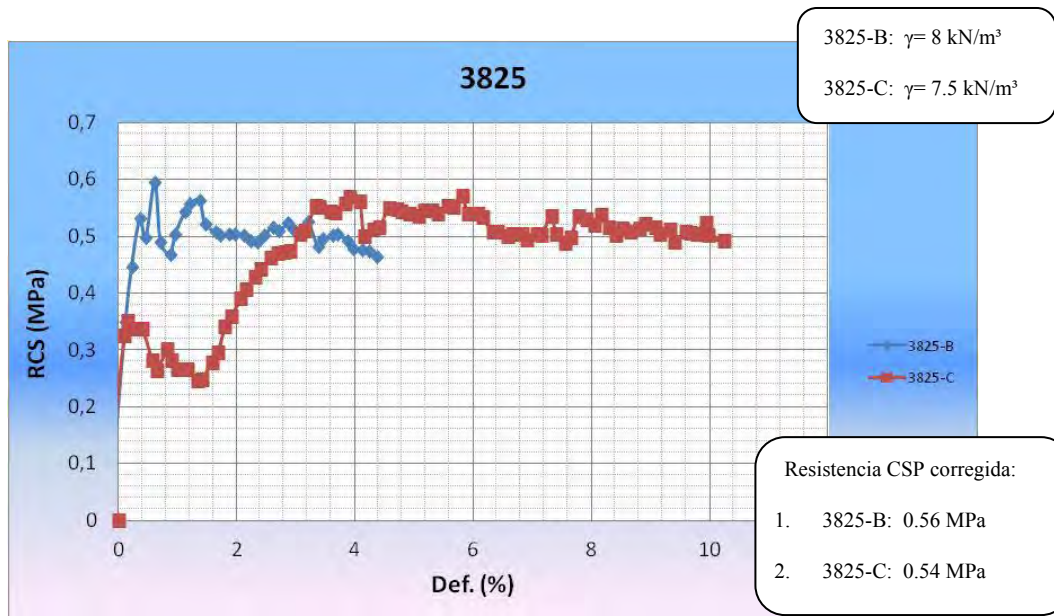
A-1.5.1.9.2.6 Muestra 7078-VII.



A-1.5.1.10 EST. M-3825.



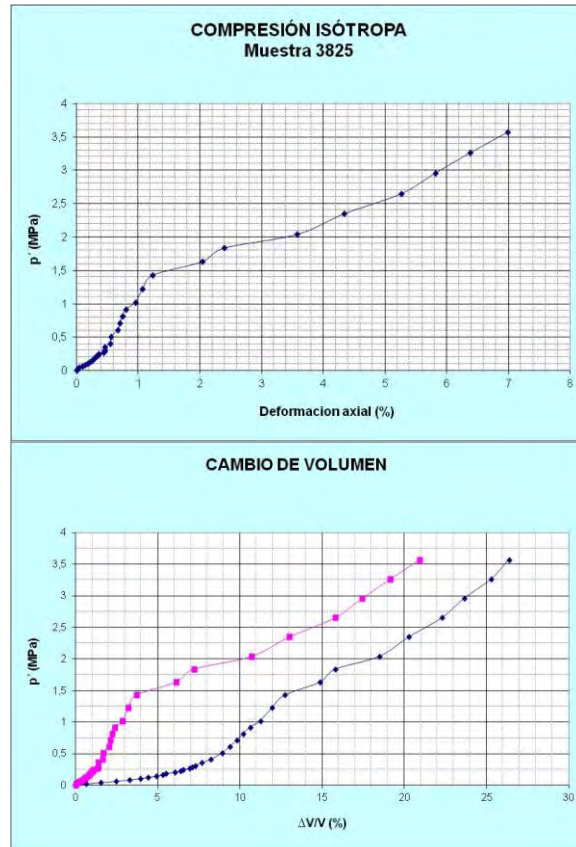
A-1.5.1.10.1 ENSAYO CSP.



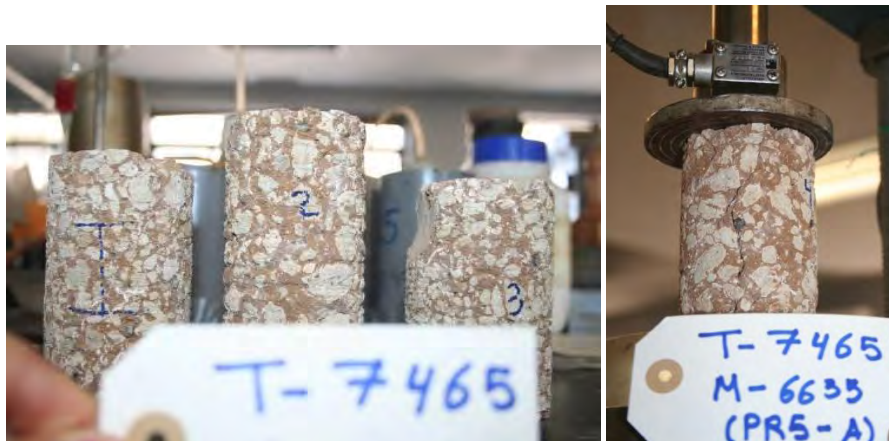
A-1.5.1.10.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.10.2.1 Muestra 3825-A.

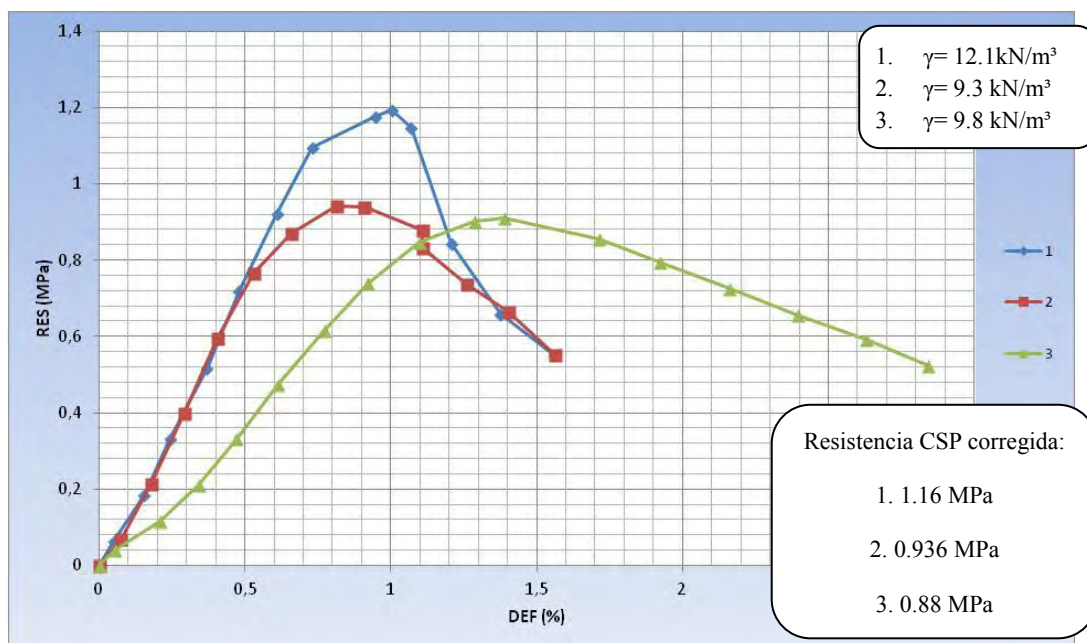
$$\gamma = 8.75 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.11 PZT. M-6635 y 6636.



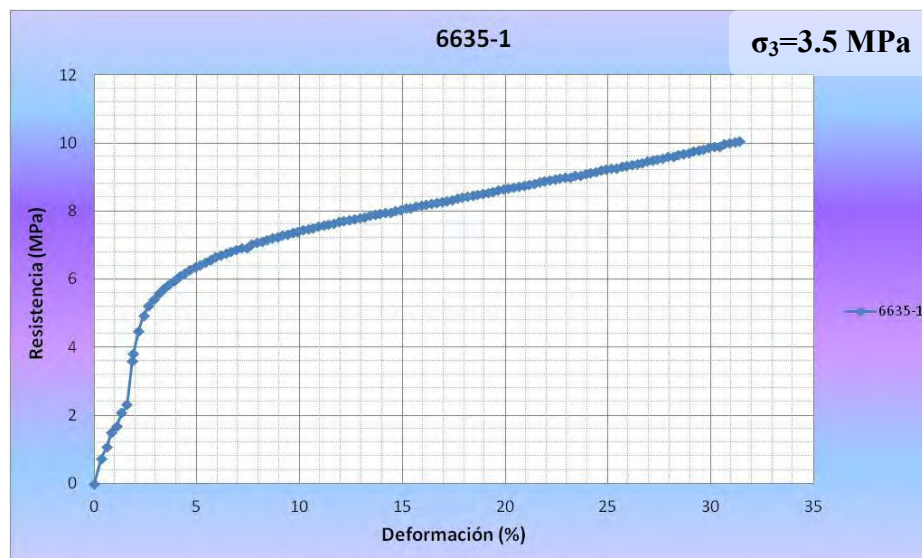
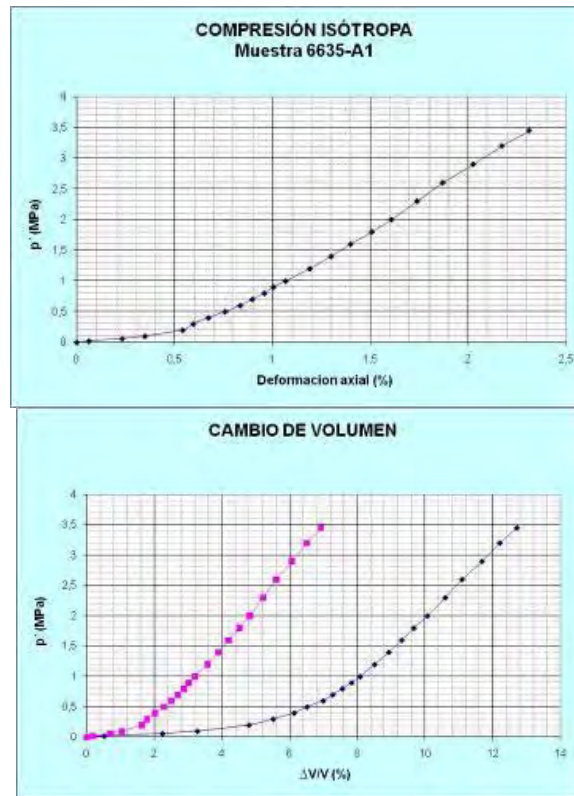
A-1.5.1.11.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.11.2 ENSAYO CI + TIS.

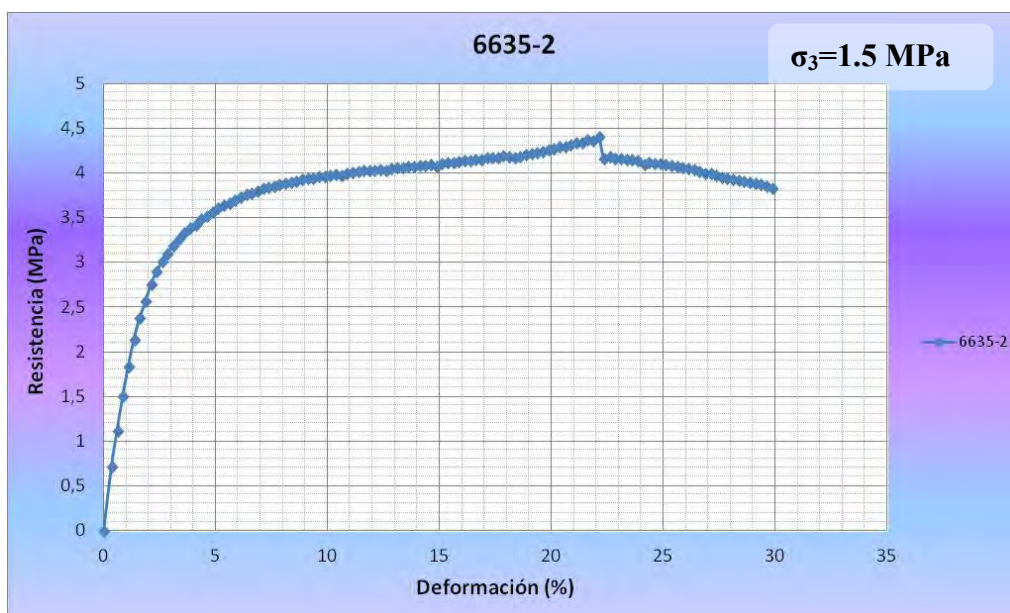
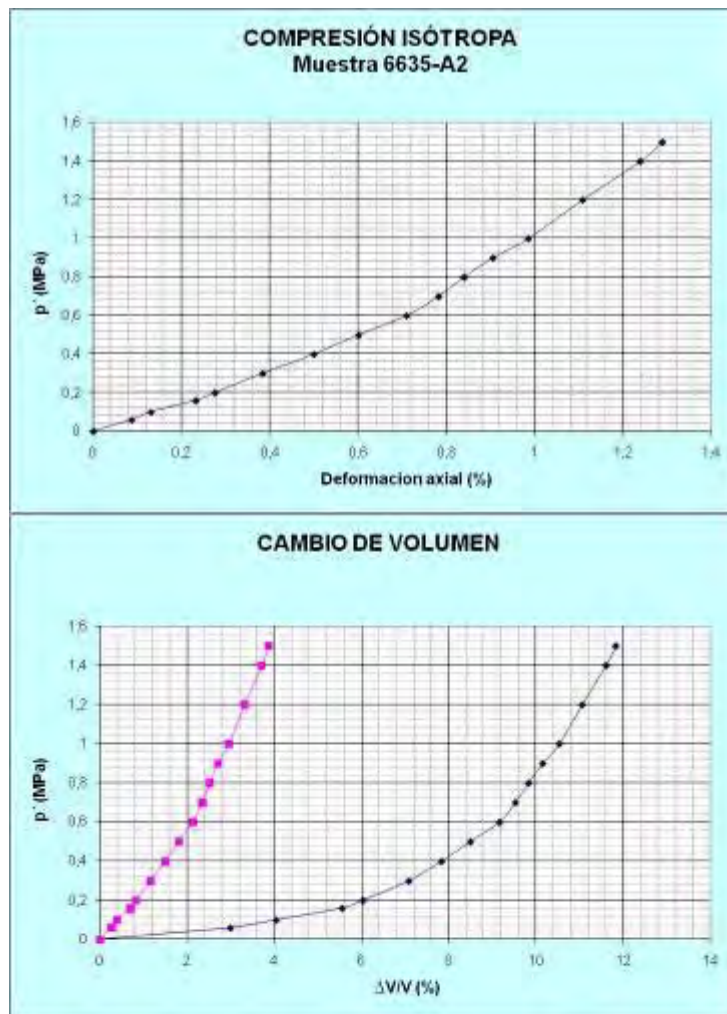
1. Muestra 6635-1.

$$\gamma = 8.87 \text{ kN/m}^3$$



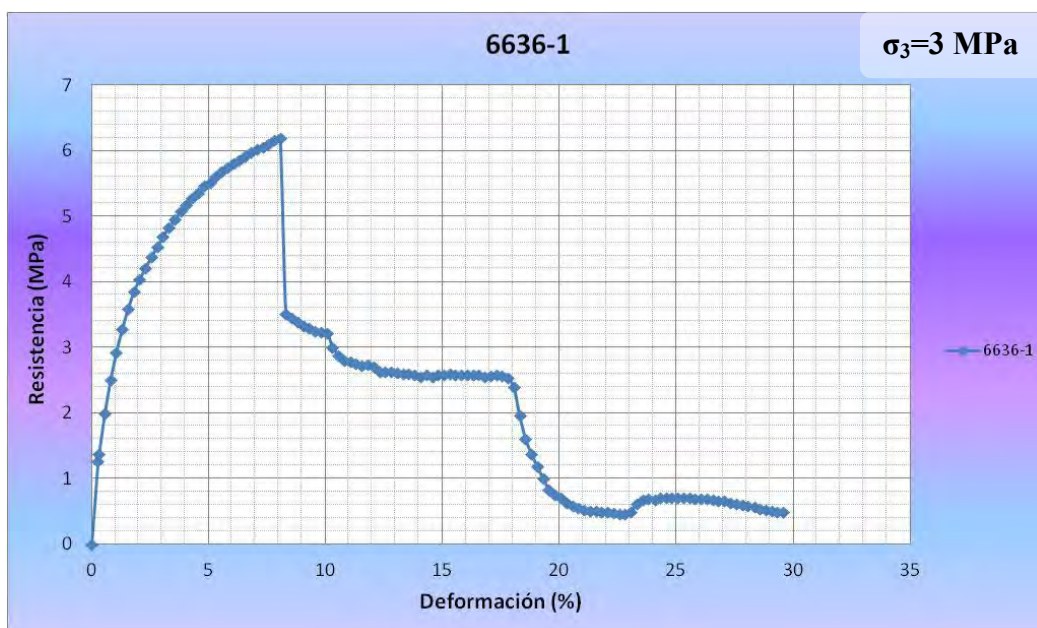
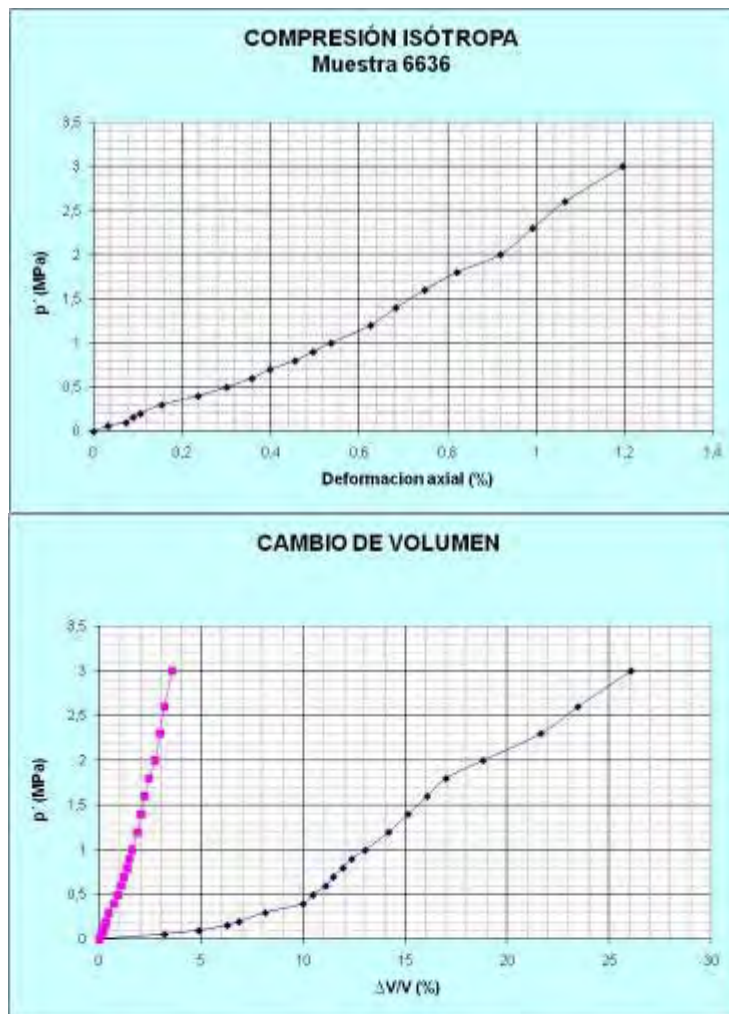
A-1.5.1.11.2.1 Muestra 6635-2.

$$\gamma = 10.08 \text{ kN/m}^3$$



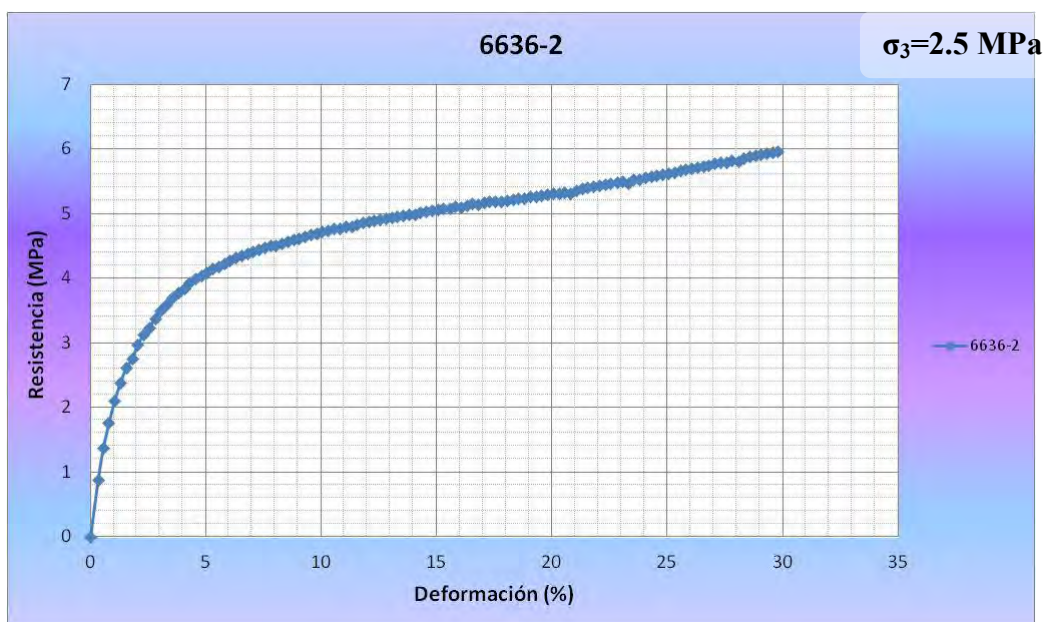
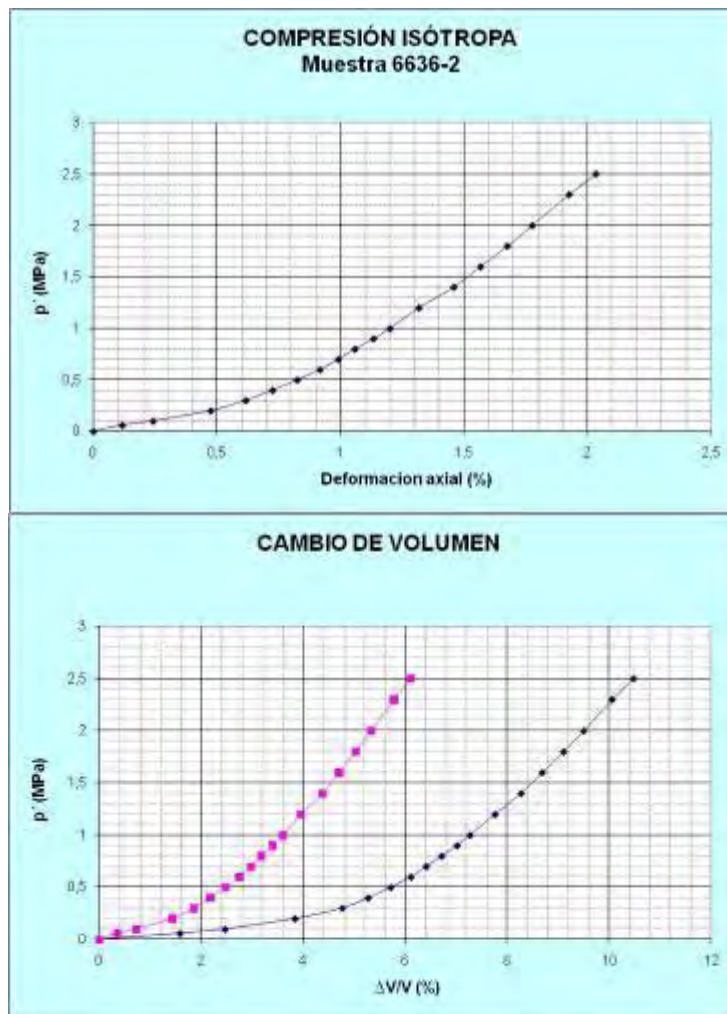
A-1.5.1.11.2 Muestra 6636-1.

$$\gamma = 11.06 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.11.2.3 Muestra 6636-2.

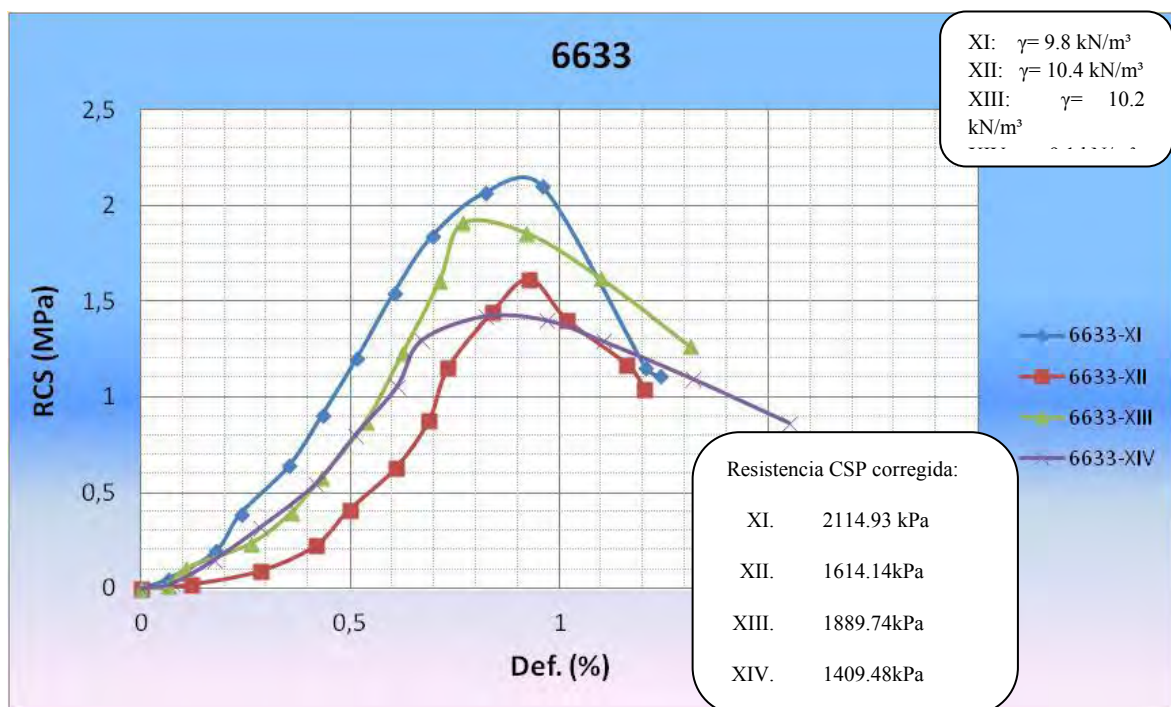
$$\gamma = 9.77 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.12 PZT-M. M-6633.



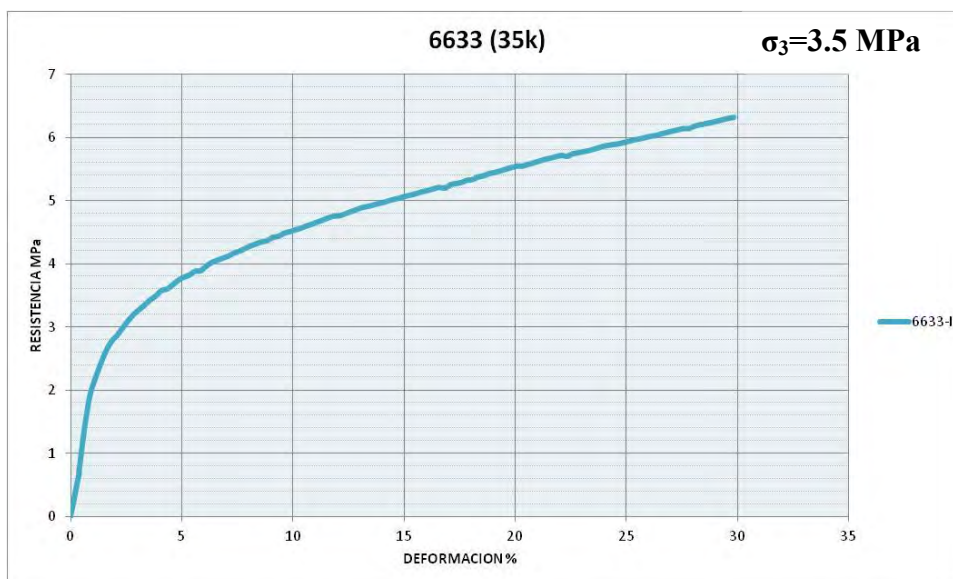
A-1.5.1.12.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.12.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.12.2.1 Muestra 6633-I.

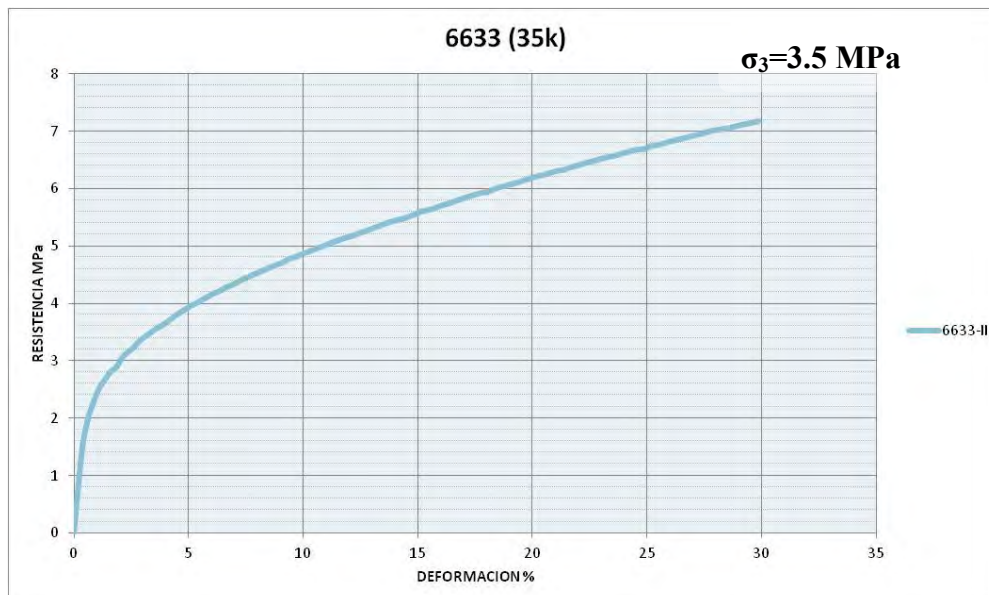
$$\gamma = 9.29 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.12.3 Muestra 6633-II.

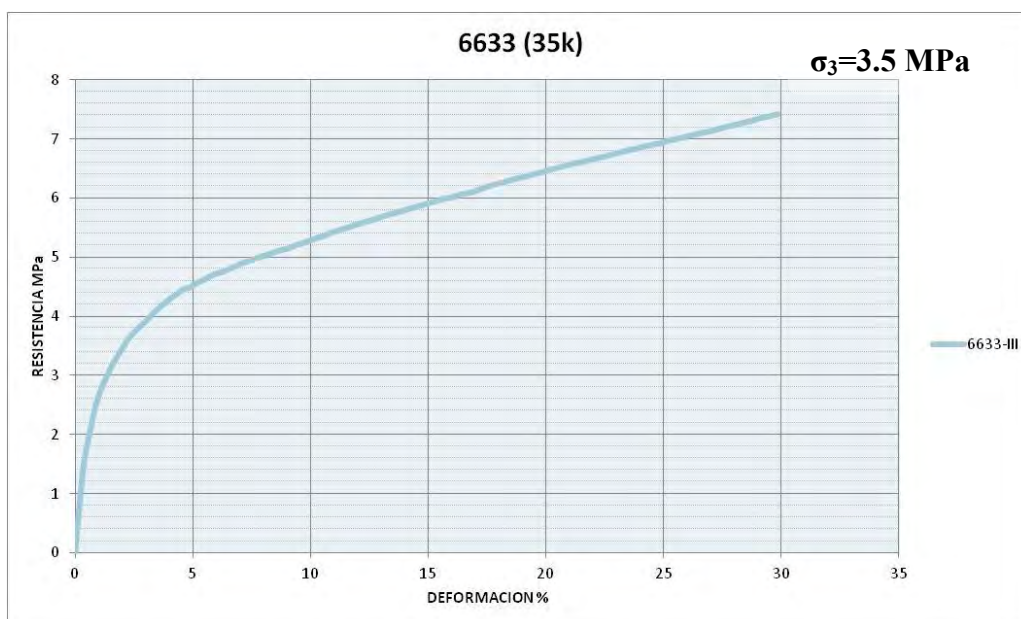
$$\gamma = 9.10 \text{ kN/m}^3$$

Se perforó la membrana y se repitió el ensayo.



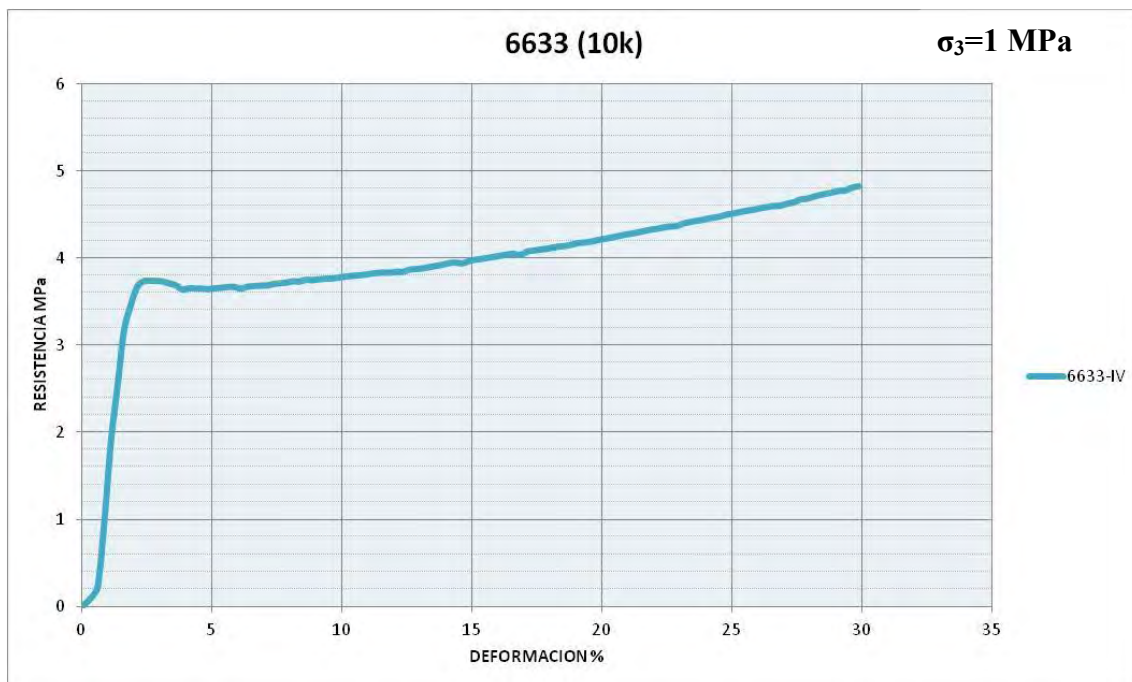
A-1.5.1.12.3.1 Muestra 6633-III.

$\gamma = 9.06 \text{ kN/m}^3$



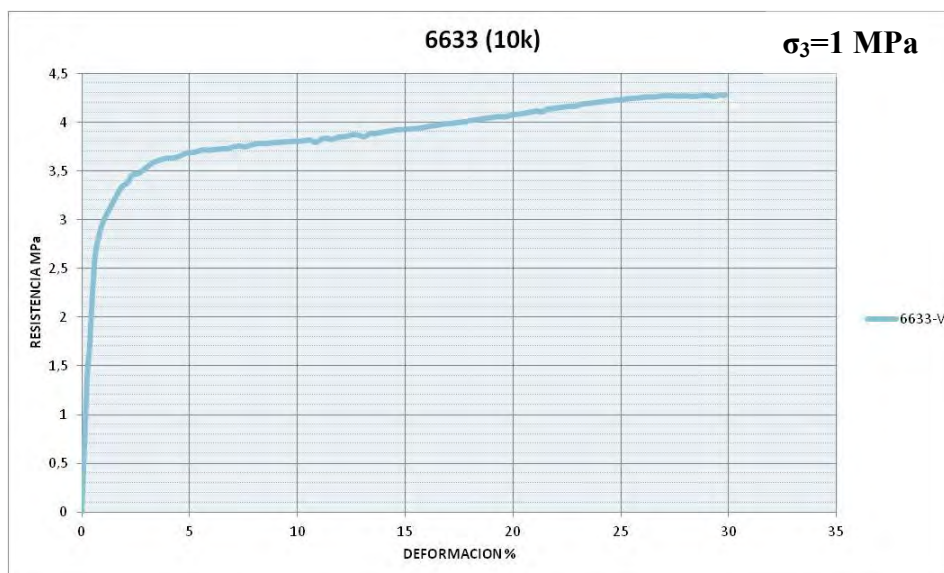
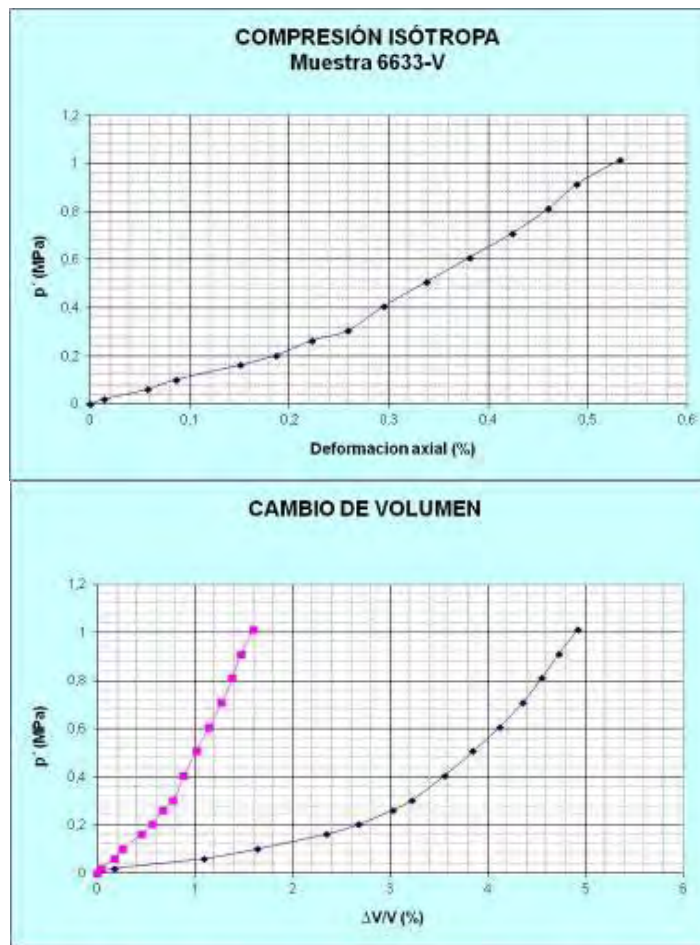
A-1.5.1.12.3.2 Muestra 6633-IV.

$$\gamma = 9.30 \text{ kN/m}^3$$

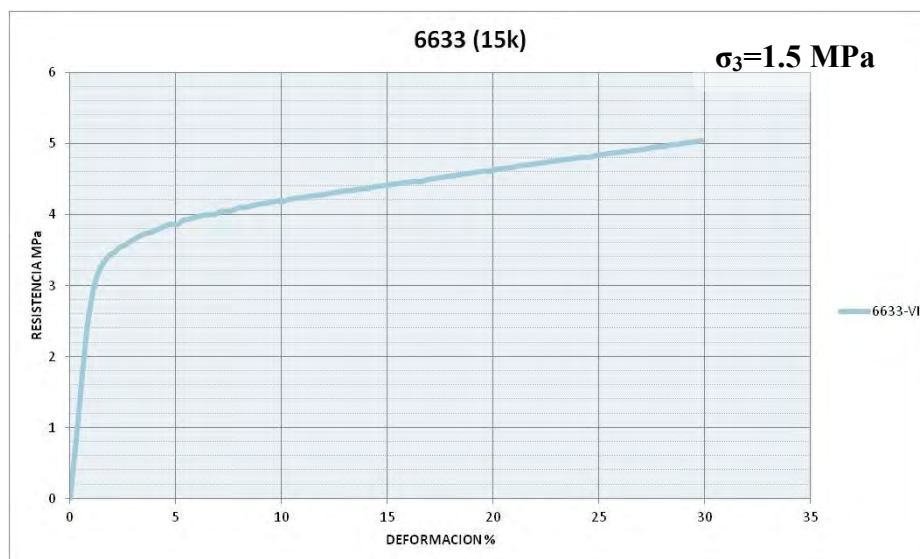
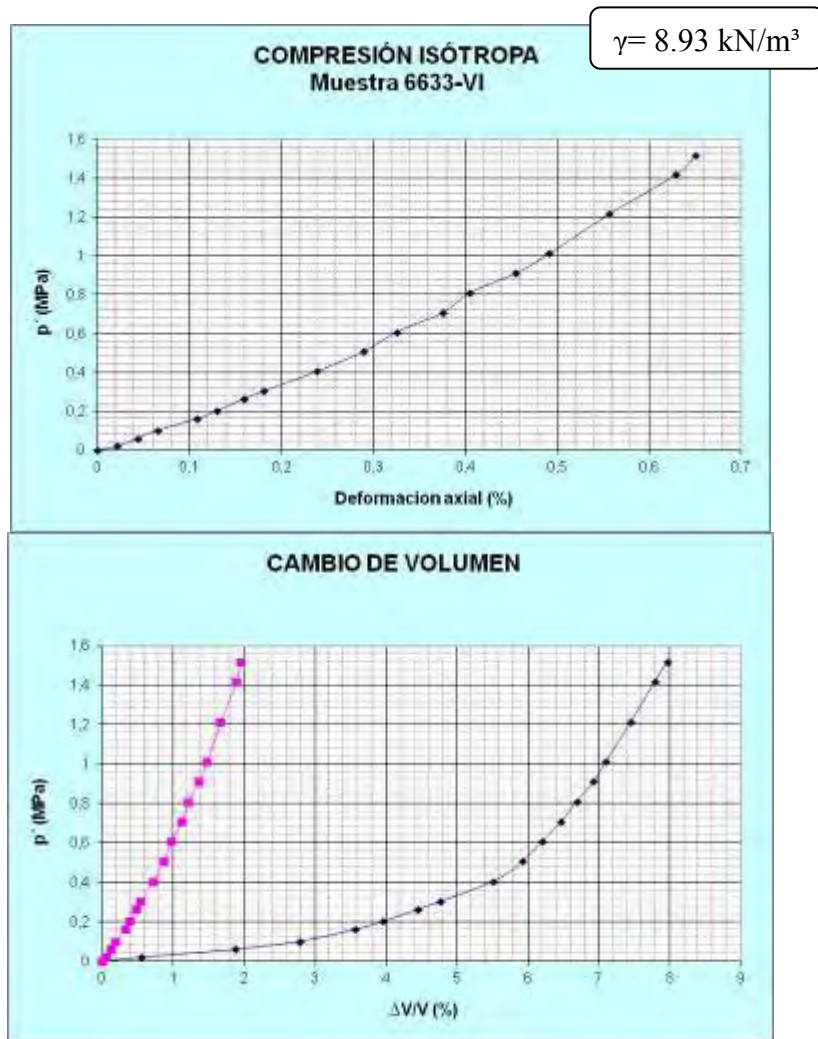


A-1.5.1.12.3.3 Muestra 6633-V.

$$\gamma = 9.08 \text{ kN/m}^3$$

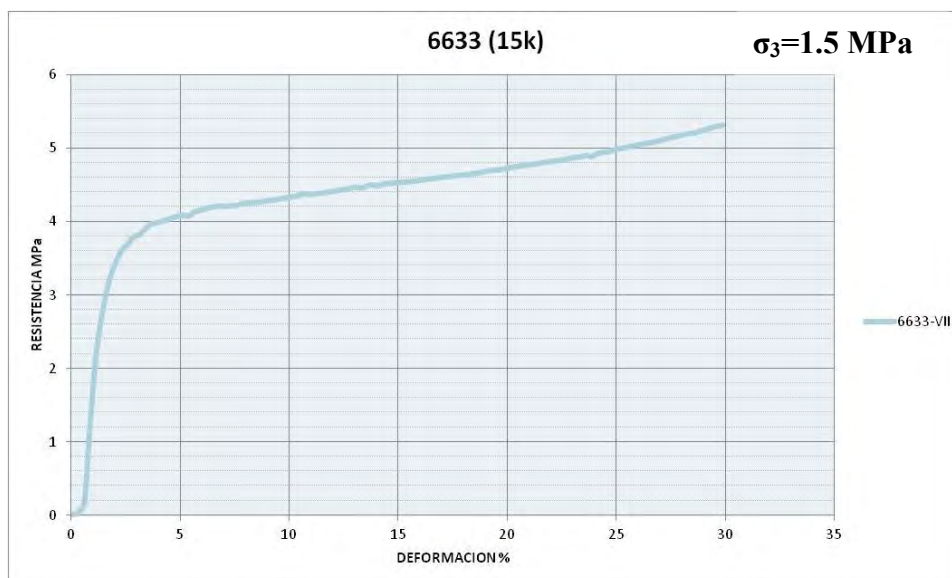


A-1.5.1.12.3.4 Muestra 6633-VI.



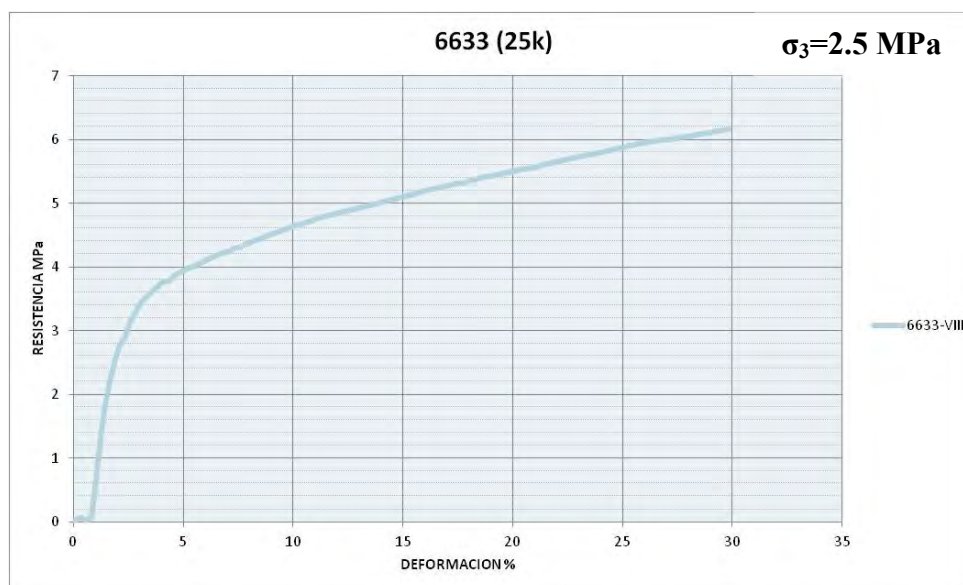
A-1.5.1.12.3.5 Muestra 6633-VII.

$$\gamma = 9.09 \text{ kN/m}^3$$

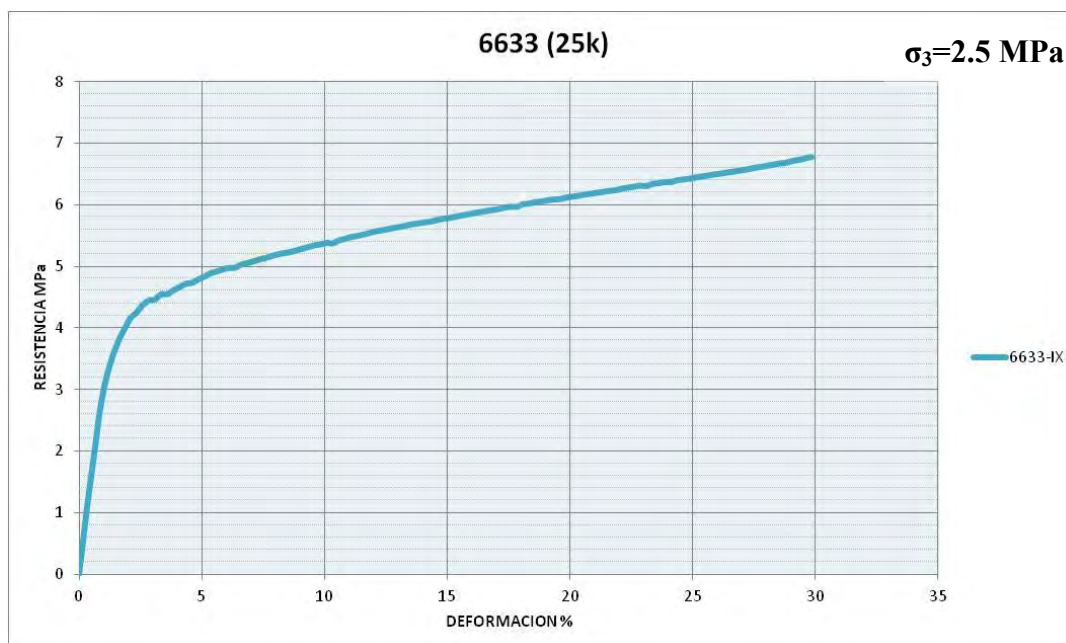
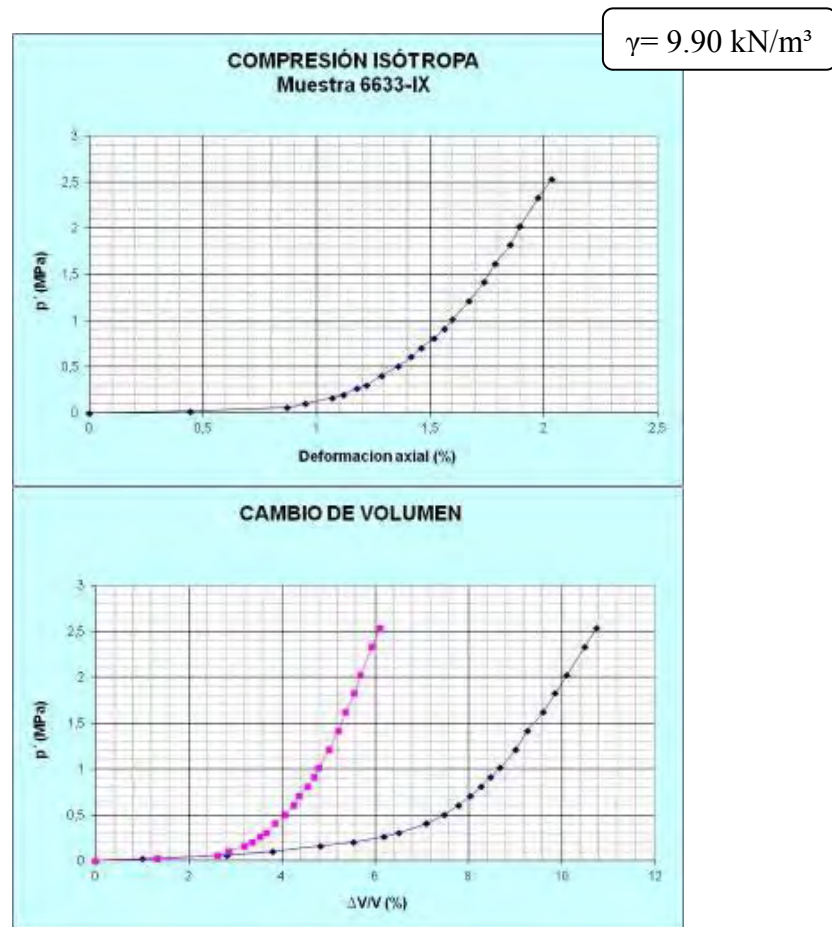


A-1.5.1.12.3.6 Muestra 6633-VIII.

$$\gamma = 9.40 \text{ kN/m}^3$$



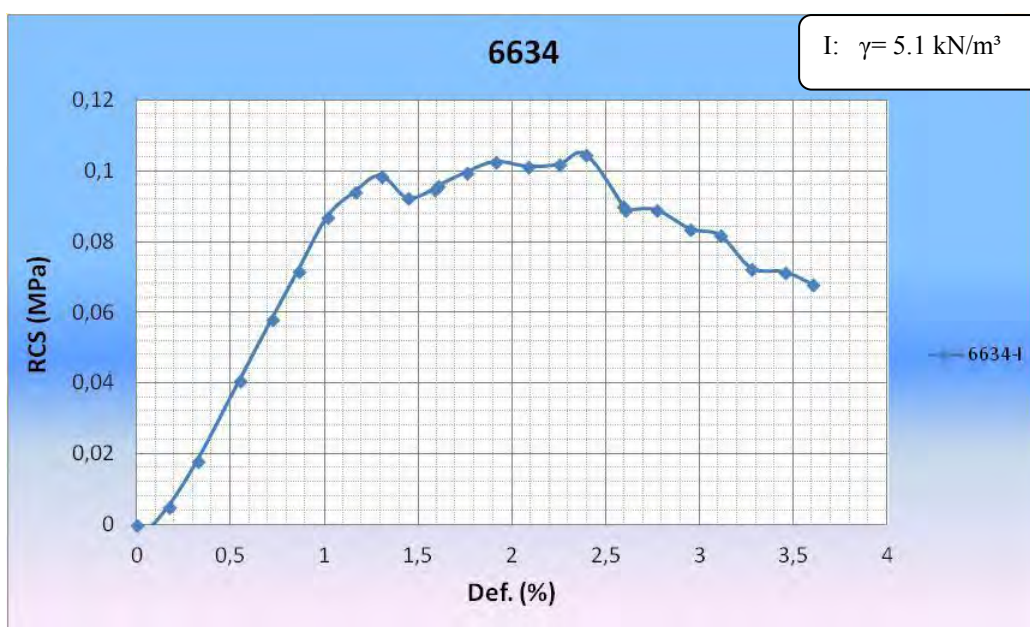
A-1.5.1.12.3.7 Muestra 6633-IX.



A-1.5.1.13 PZT.M-6634.



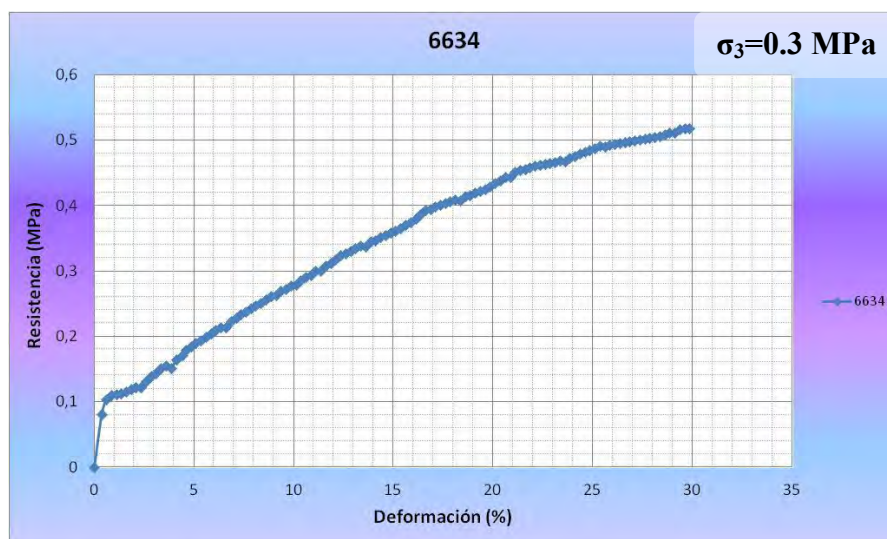
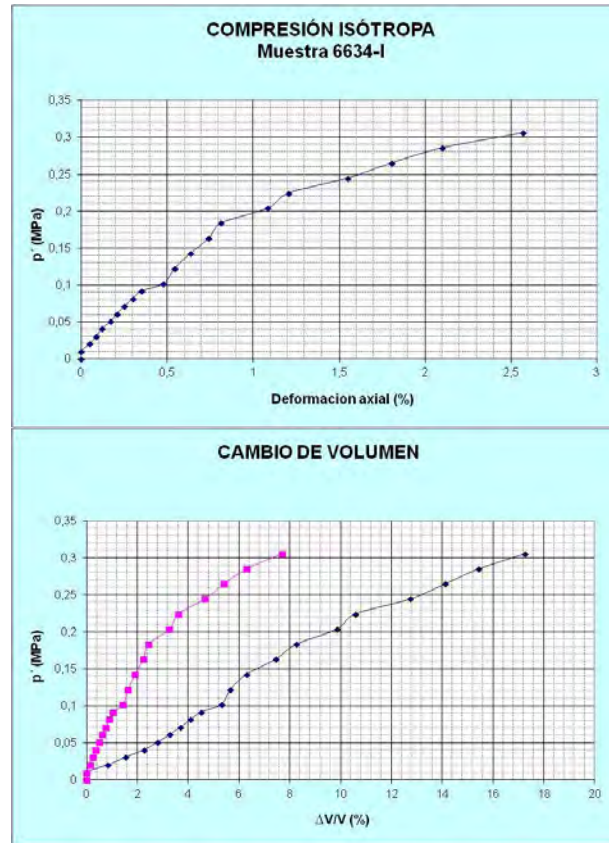
A-1.5.1.13.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.13.2 ENSAYO CI + TIS.

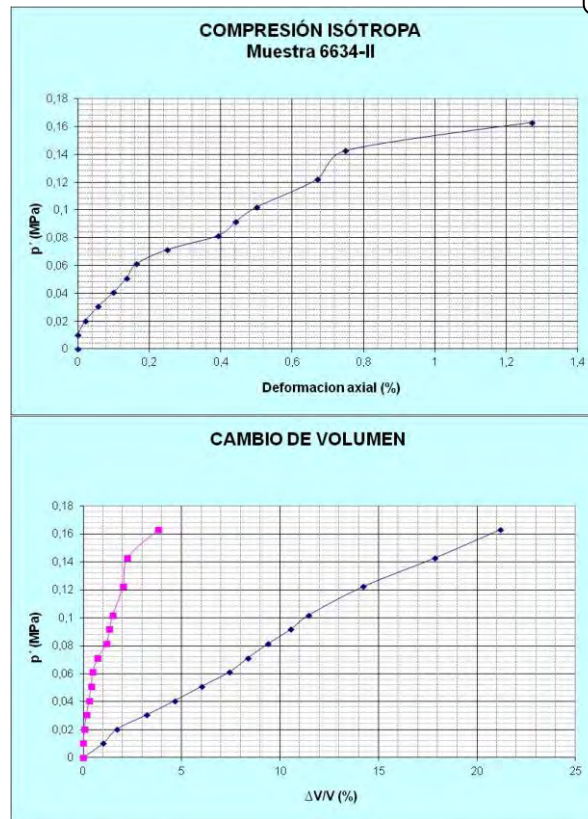
A-1.5.1.13.2.1 Muestra 6634-I.

$$\gamma = 5.20 \text{ kN/m}^3$$



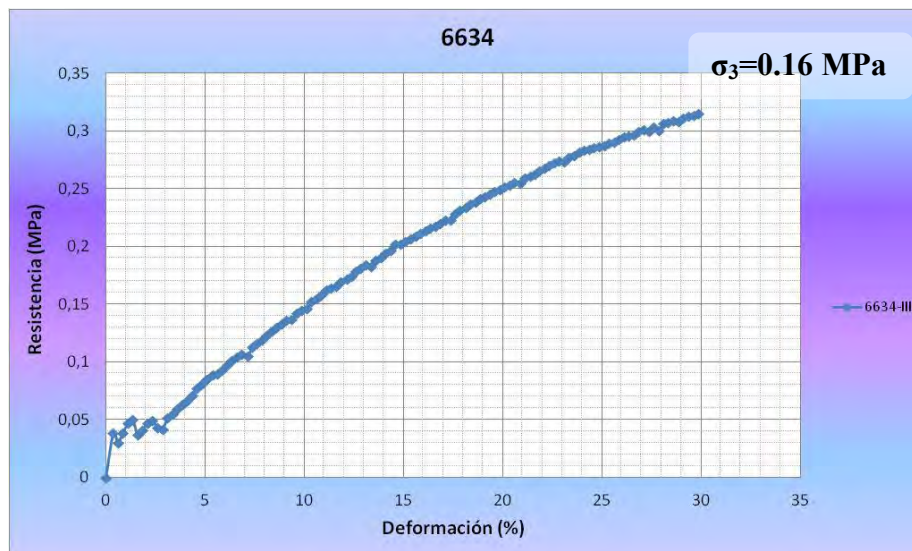
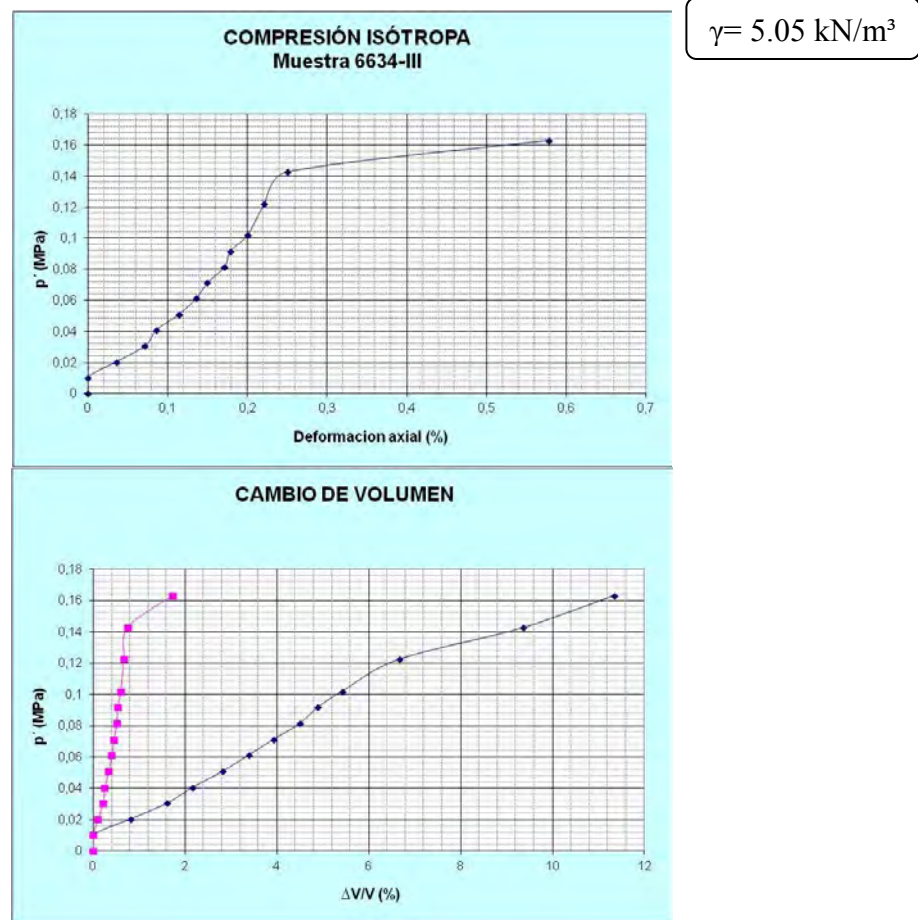
A-1.5.1.13.2 Muestra 6634-II.

$$\gamma = 5.18 \text{ kN/m}^3$$



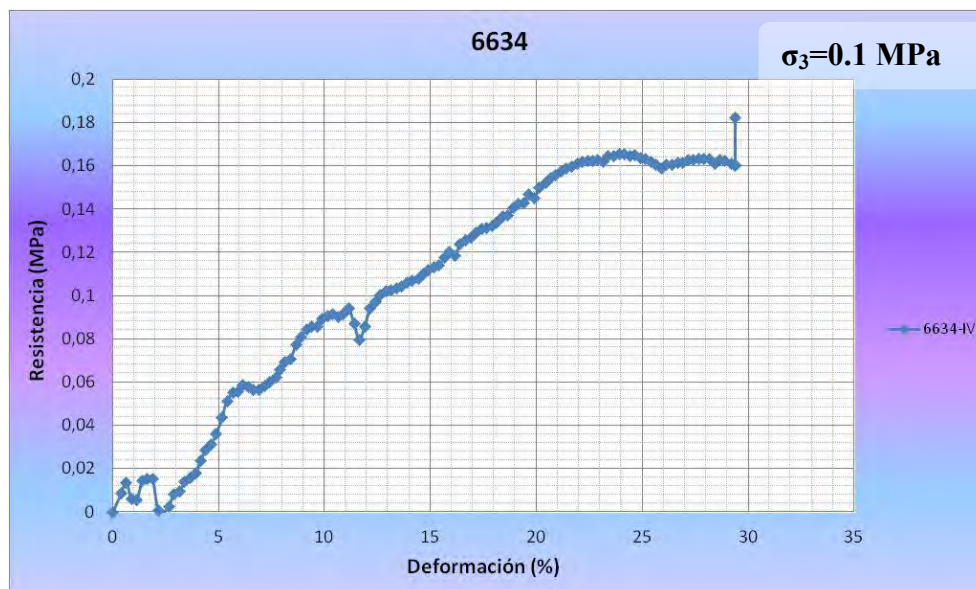
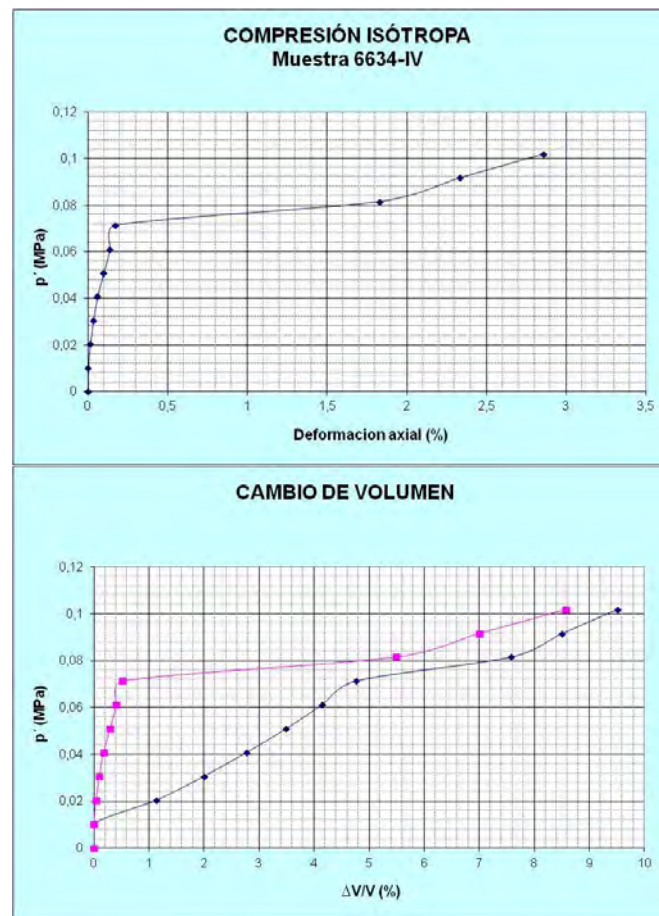
No se continuó con el TIS porque a los 0.12MPa se perforó la membrana.

A-1.5.1.13.2.3 Muestra 6634-III.



A-1.5.1.13.2.4 Muestra 6634-IV.

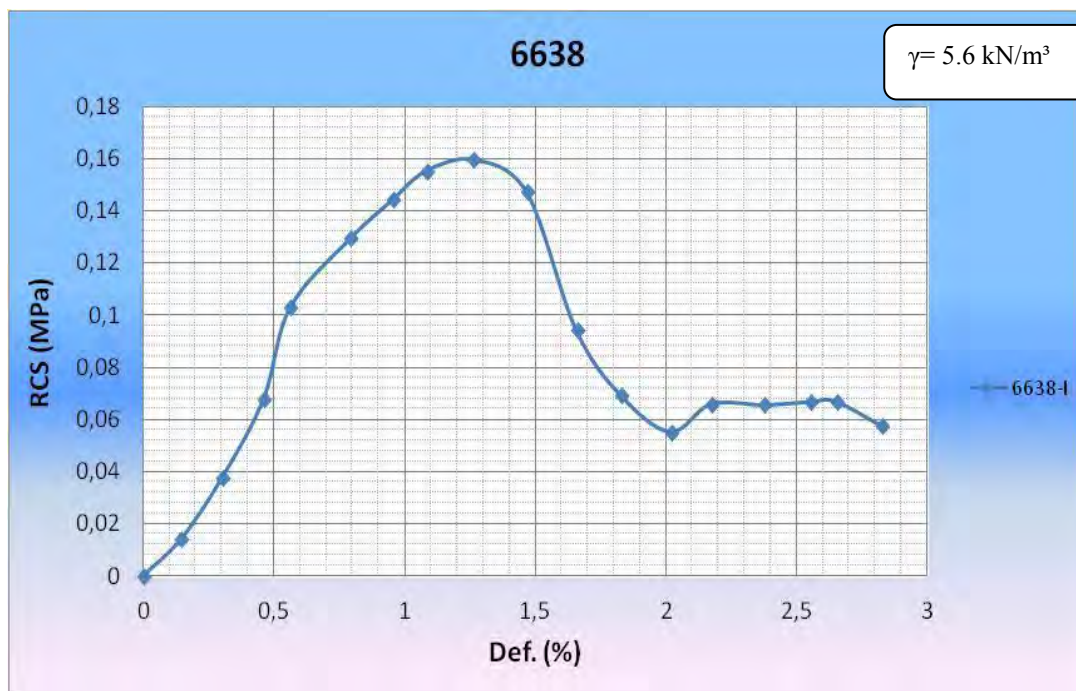
$$\gamma = 4.68 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.14 PZT. M-6638.



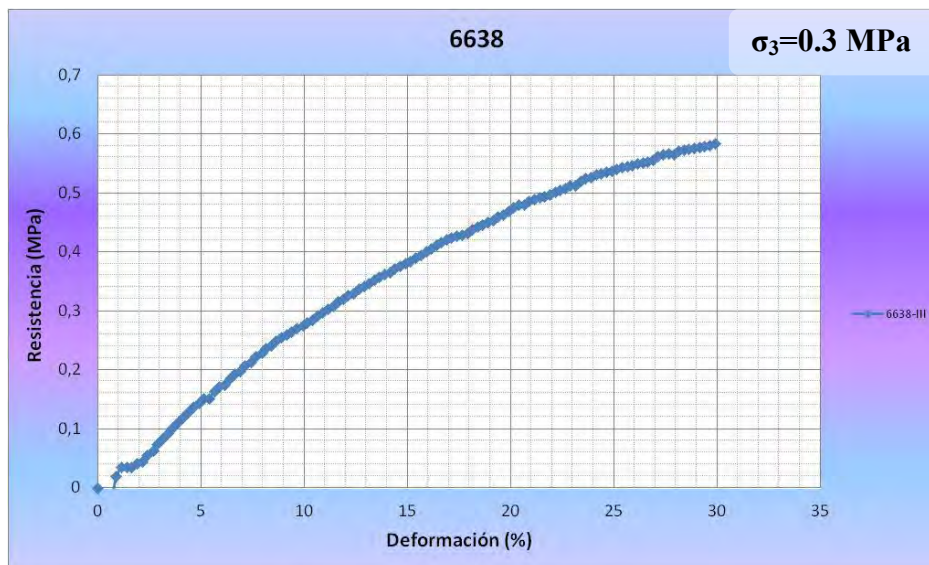
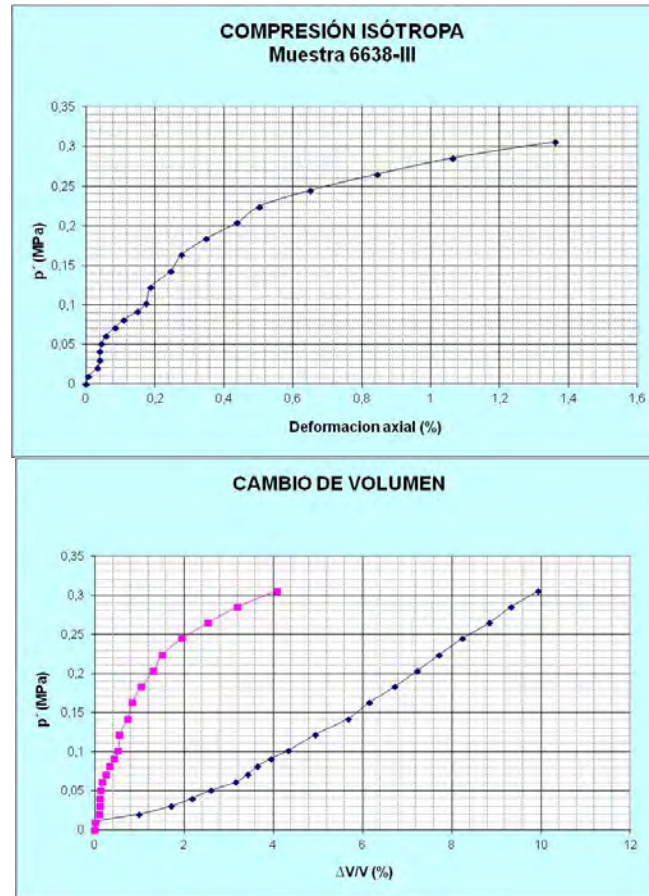
A-1.5.1.14.1 ENSAYO CSP.



A-1.5.1.14.2 ENSAYO CI + TIS.

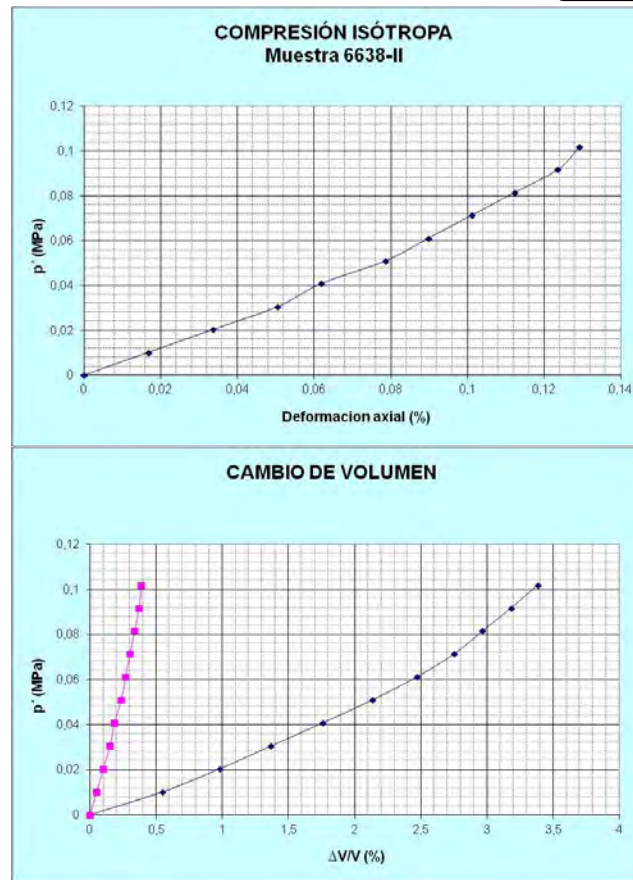
A-1.5.1.14.2.1 Muestra 6638-III.

$$\gamma = 6.92 \text{ kN/m}^3$$



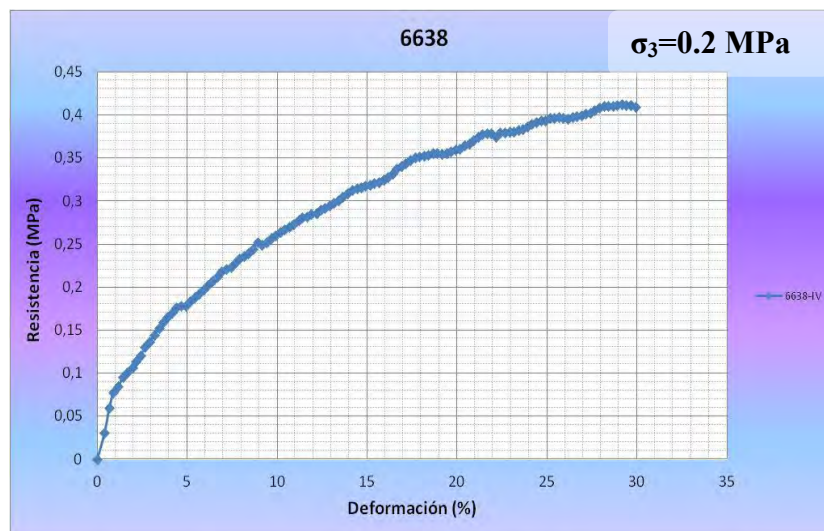
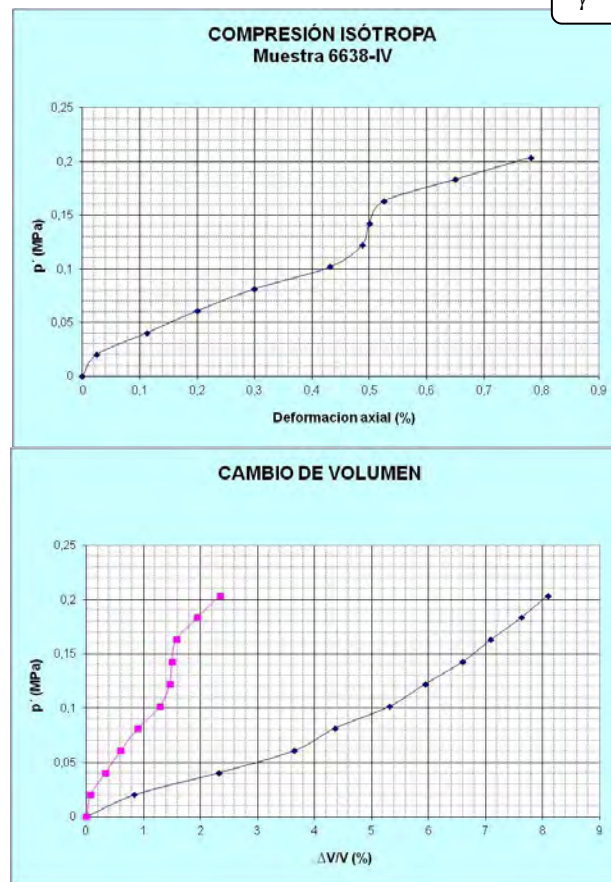
A-1.5.1.14.2 Muestra 6638-II.

$$\gamma = 5.30 \text{ kN/m}^3$$

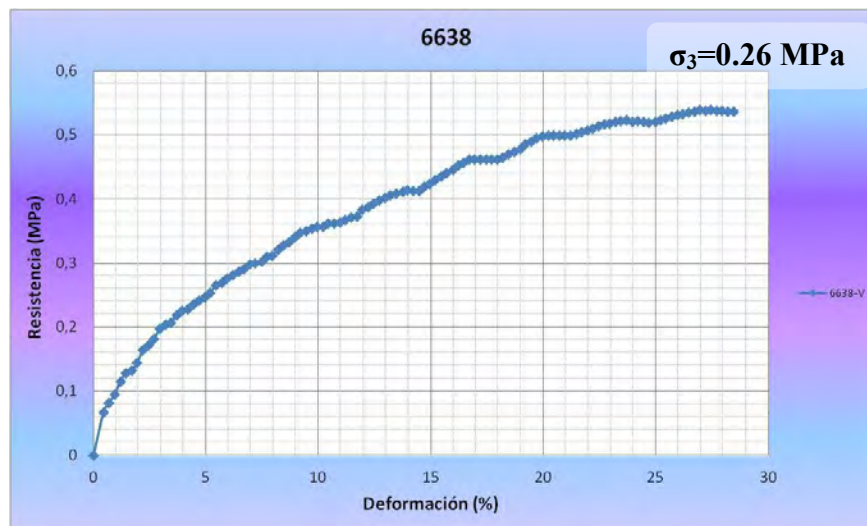
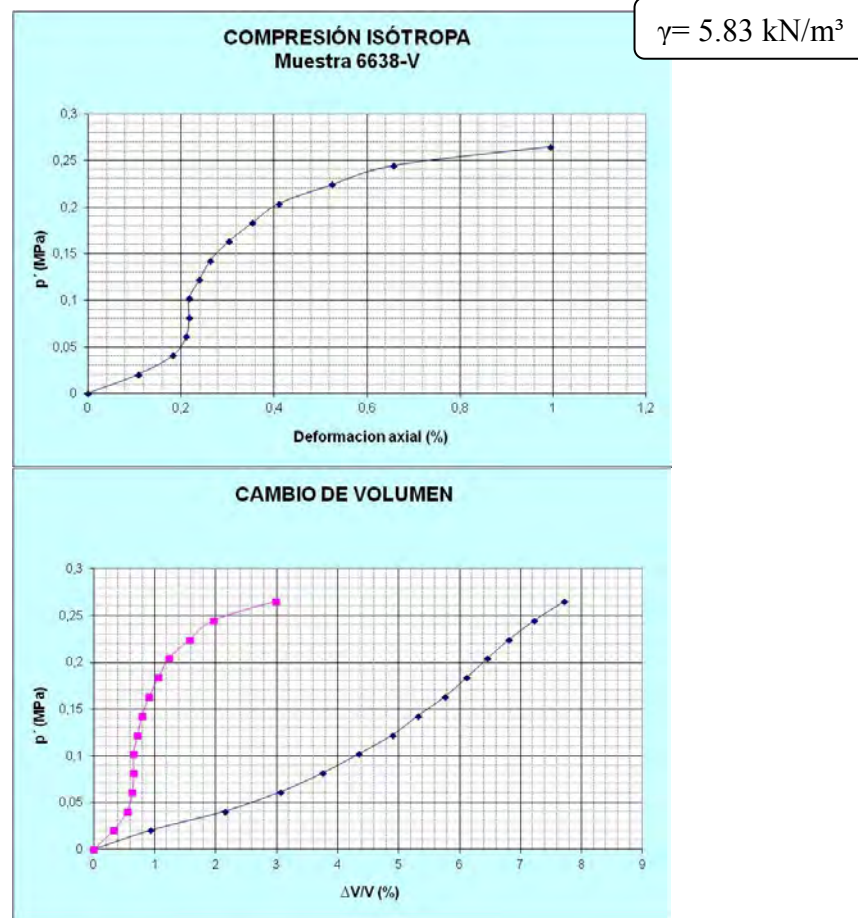


A-1.5.1.14.2.3 Muestra 6638-IV.

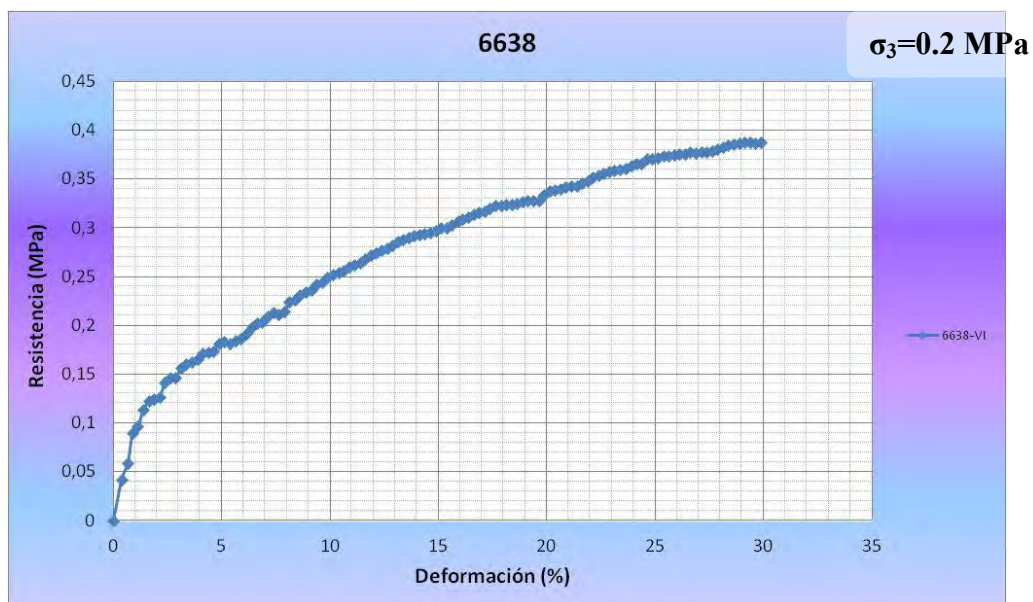
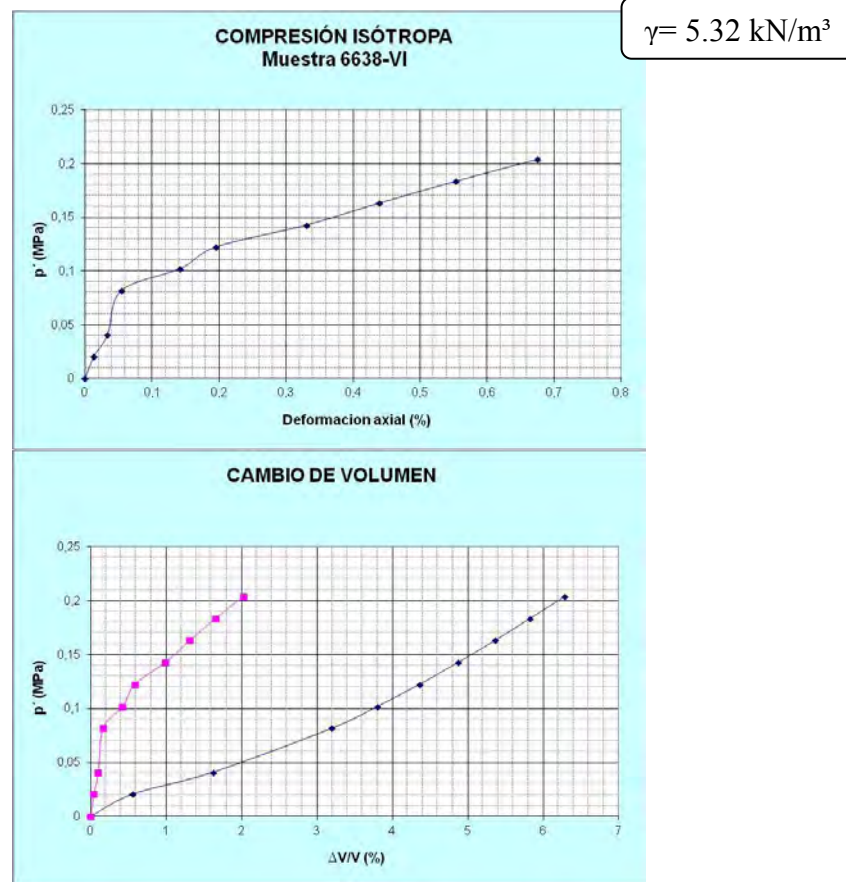
$$\gamma = 5.74 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.14.2.4 Muestra 6638-V.



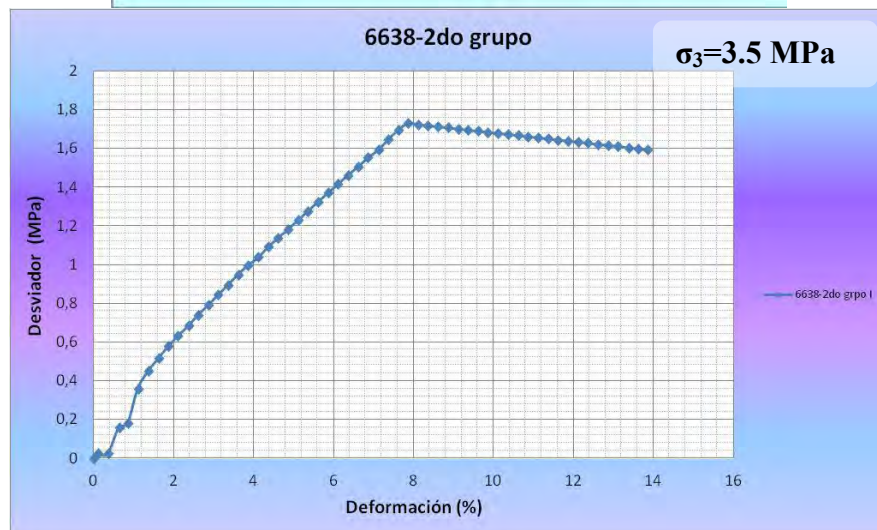
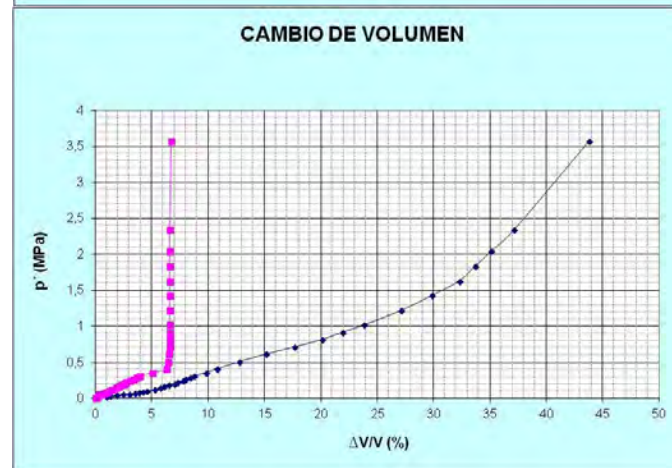
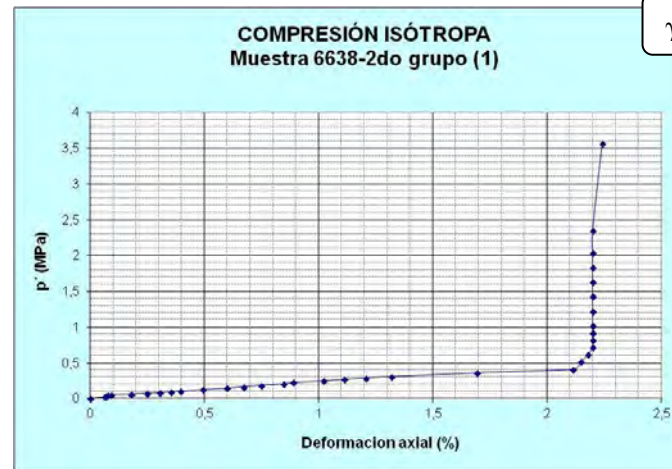
A-1.5.1.14.2.5 Muestra 6638-VI.



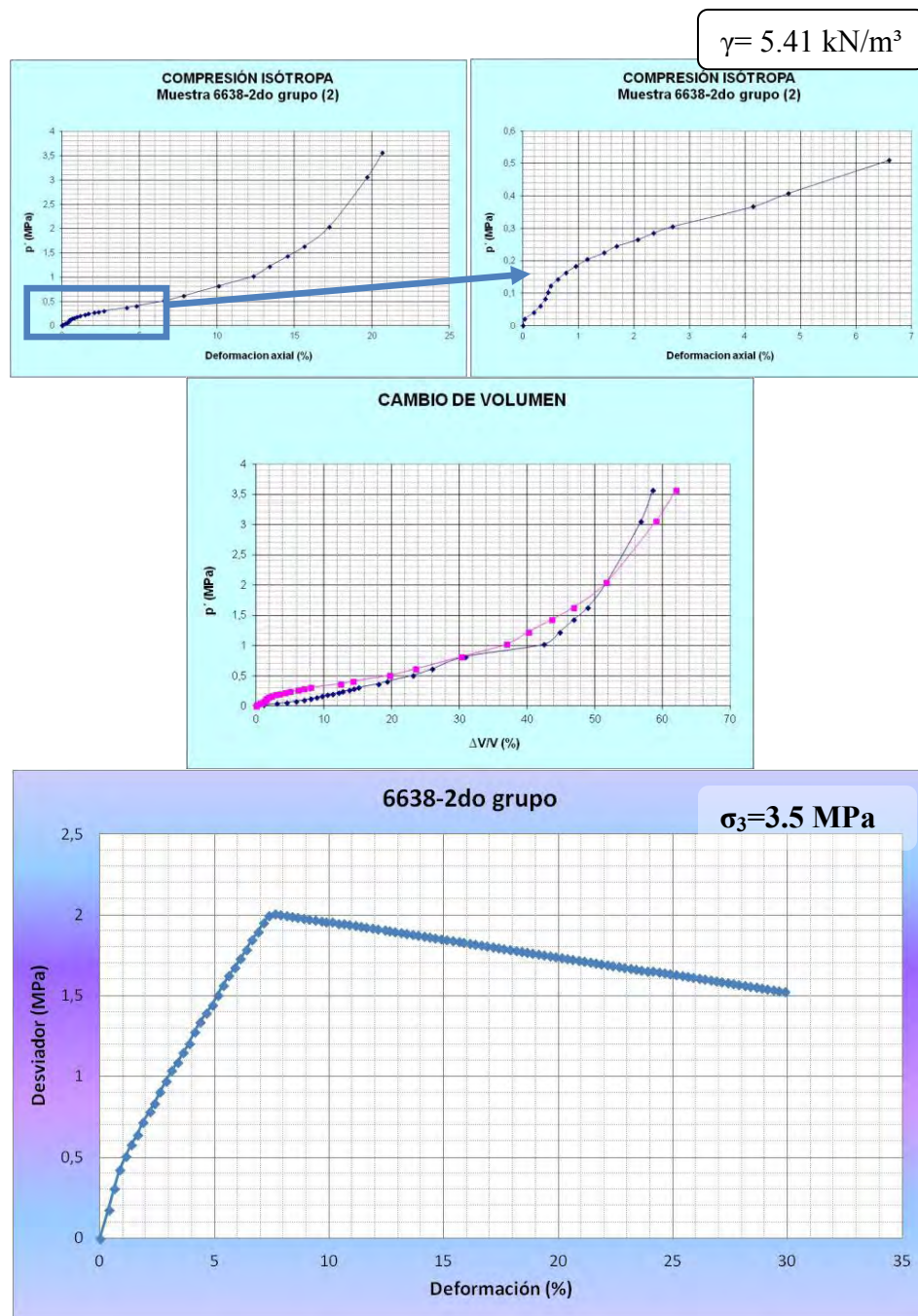
A-1.5.1.14.2.6 Muestra 2do grupo 6638-I.

CI mal

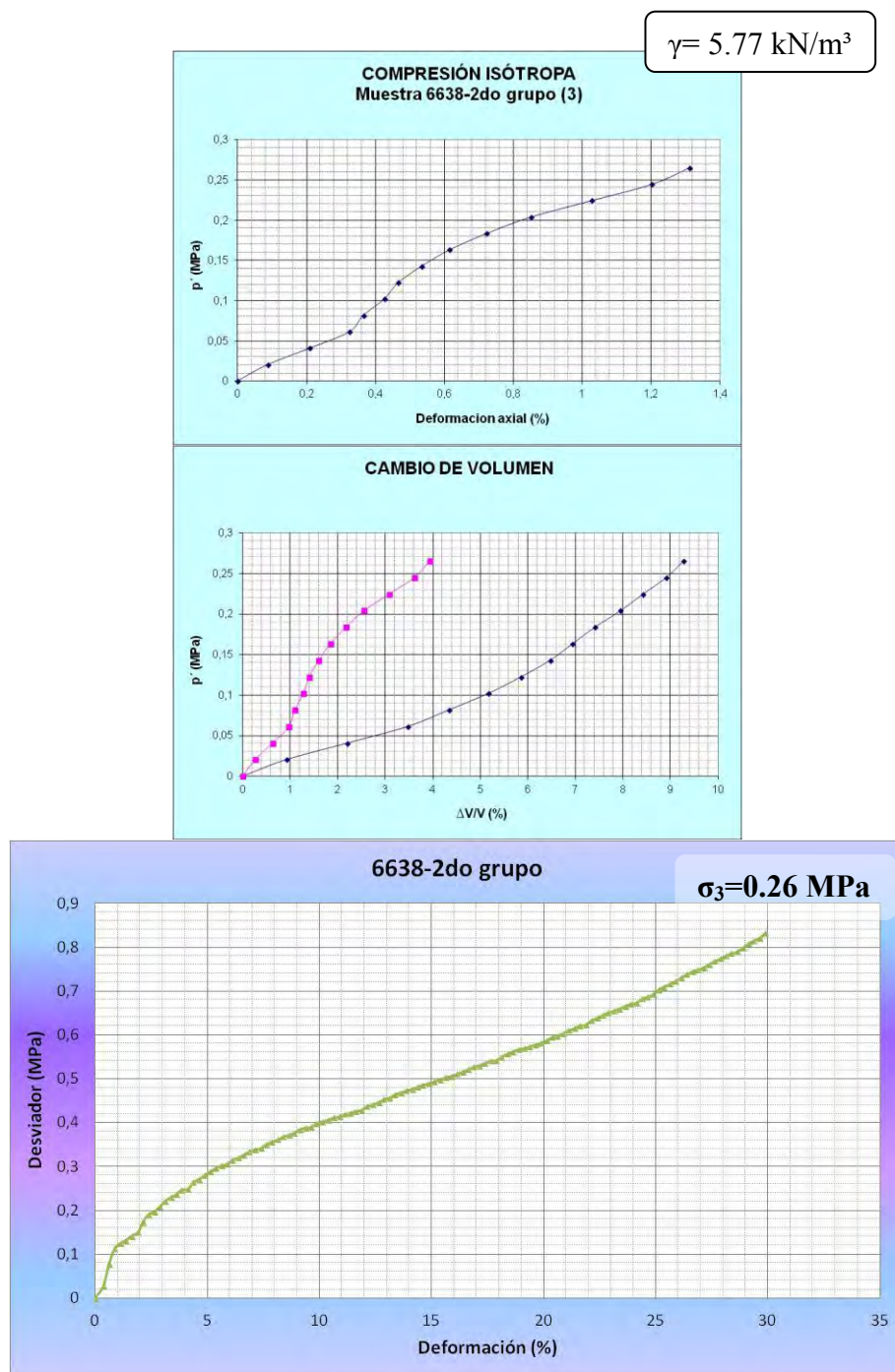
$\gamma = 5.70 \text{ kN/m}^3$



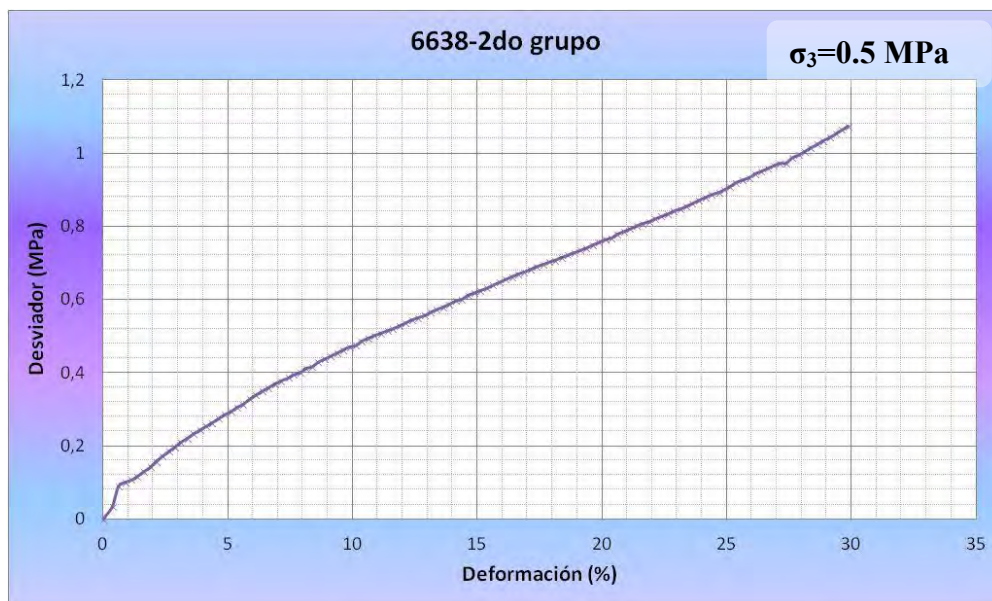
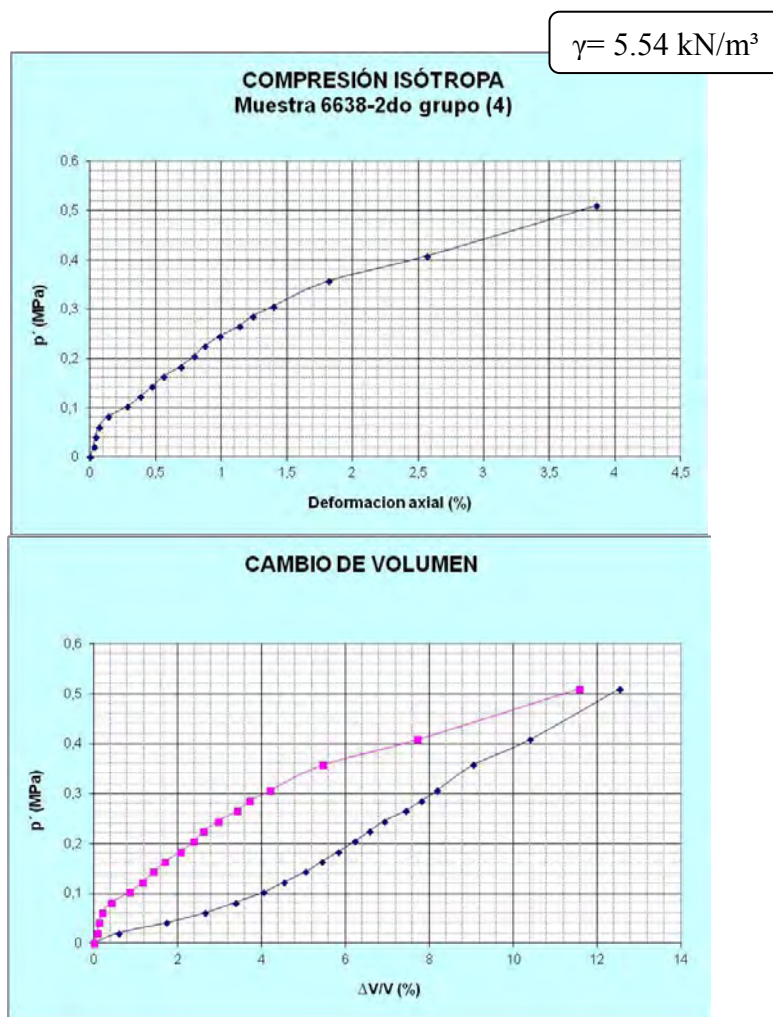
A-1.5.1.14.2.7 Muestra 2do grupo 6638-II.



A-1.5.1.14.2.8 Muestra 2do grupo 6638-III.

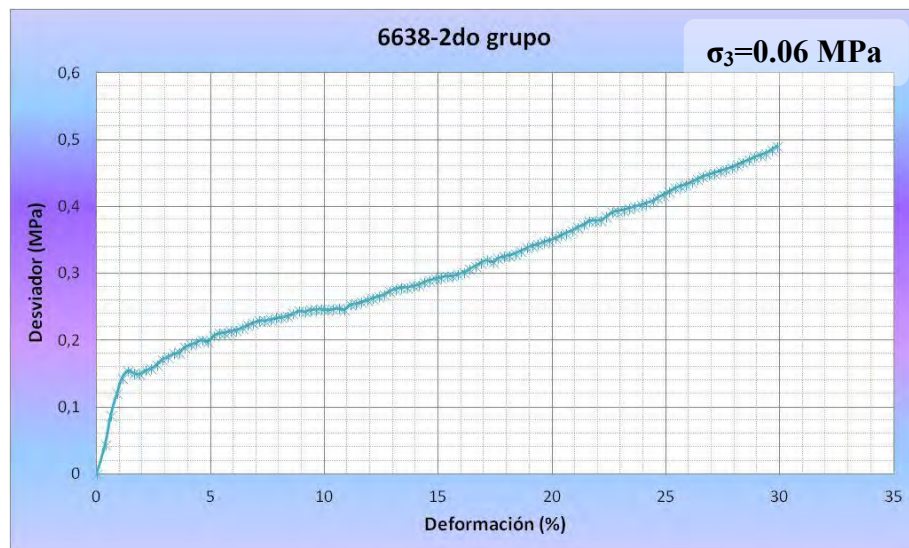
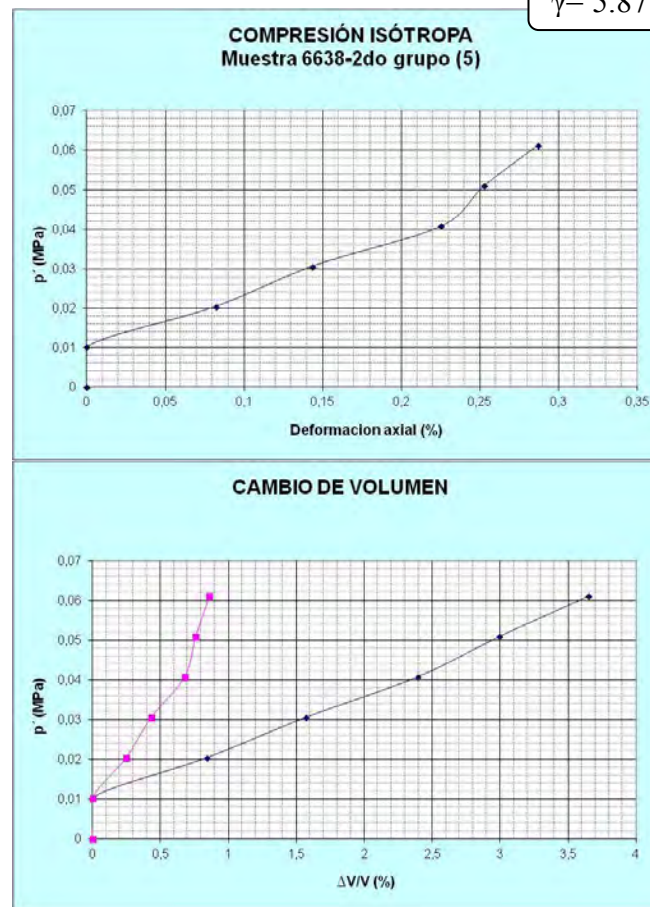


A-1.5.1.14.2.9 Muestra 2do grupo 6638-IV.



A-1.5.1.14.2.10 Muestra 2do grupo 6638-V.

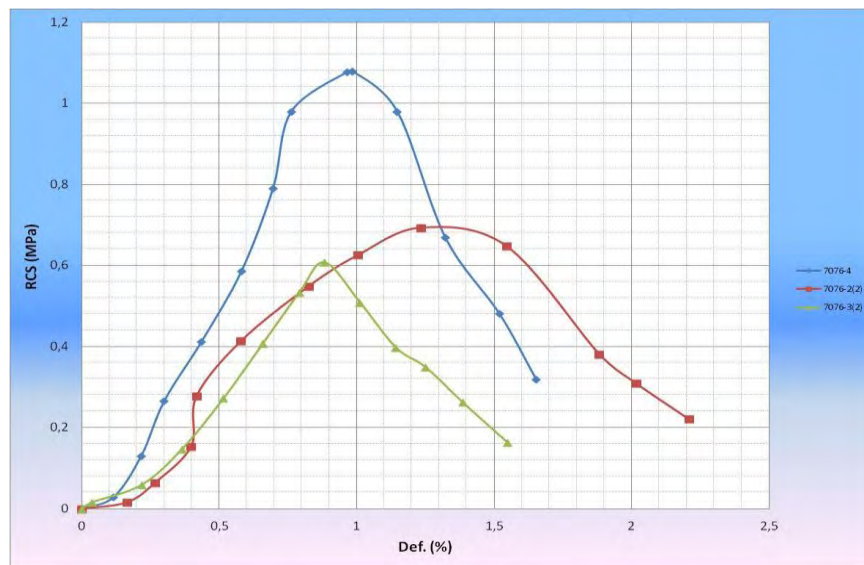
$$\gamma = 5.87 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.15 LPT-M. 7076.



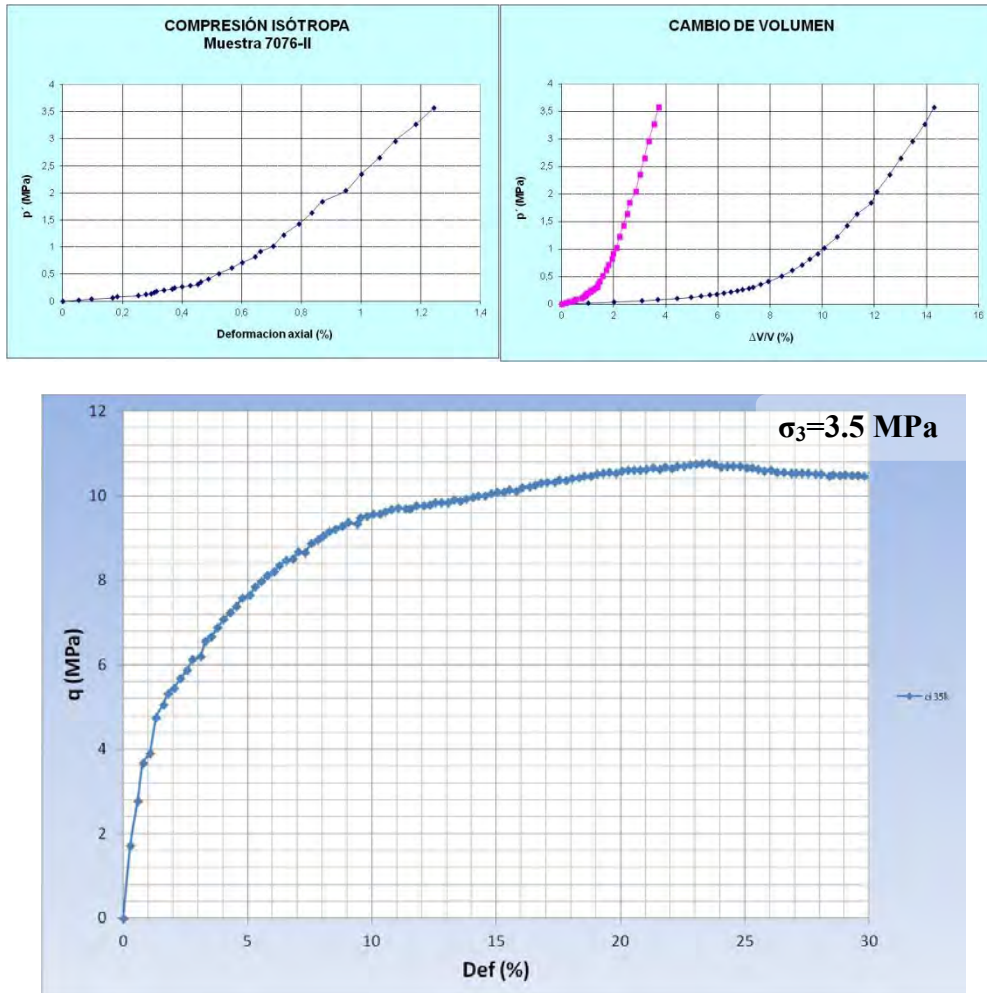
A-1.5.1.15.1 ENSAYO CSP.



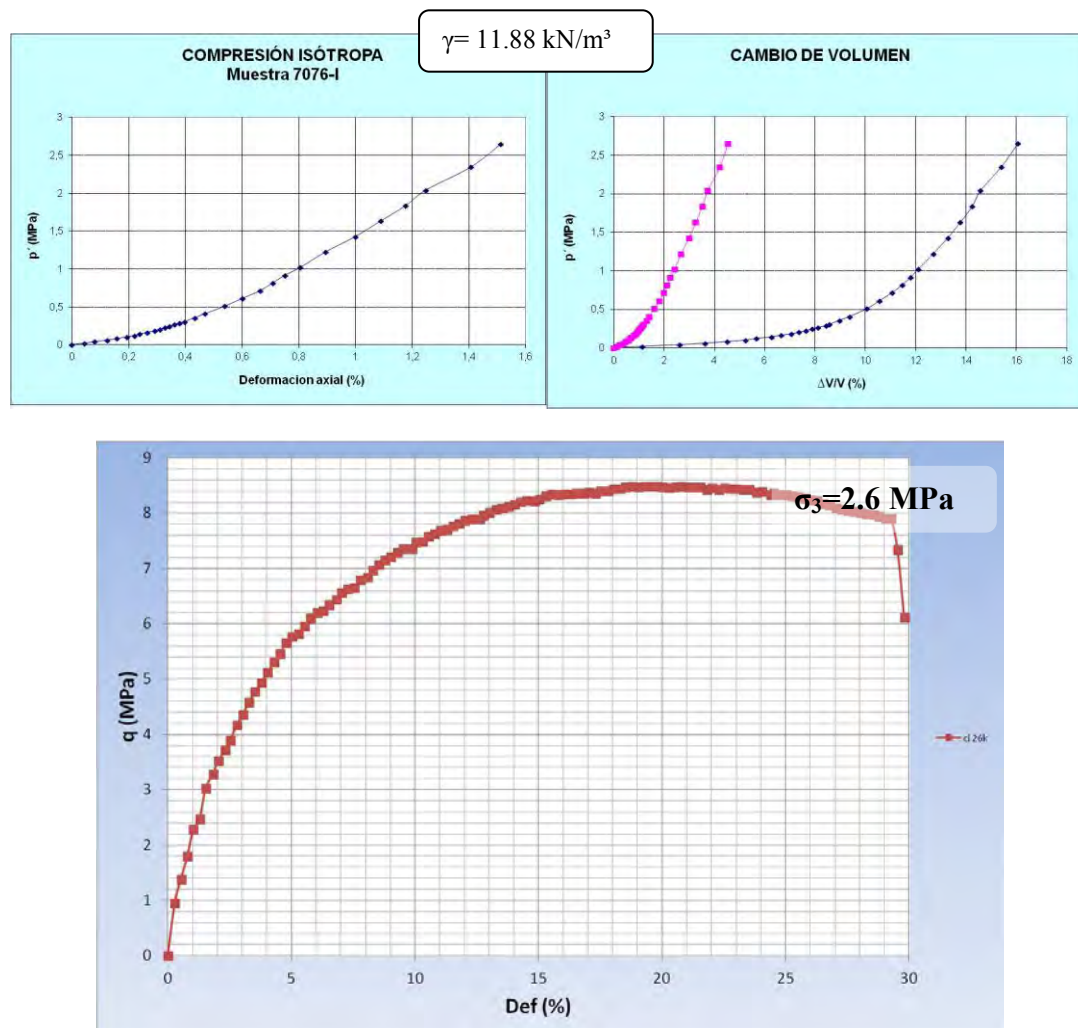
A-1.5.1.15.2 ENSAYO CI + TIS.

A-1.5.1.15.2.1 Muestra 7076-II.

$$\gamma = 12.13 \text{ kN/m}^3$$

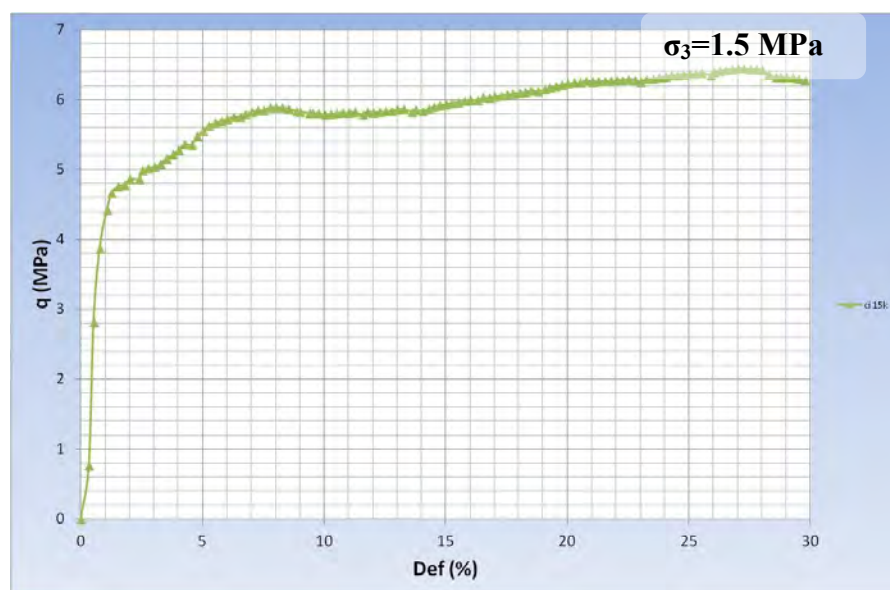
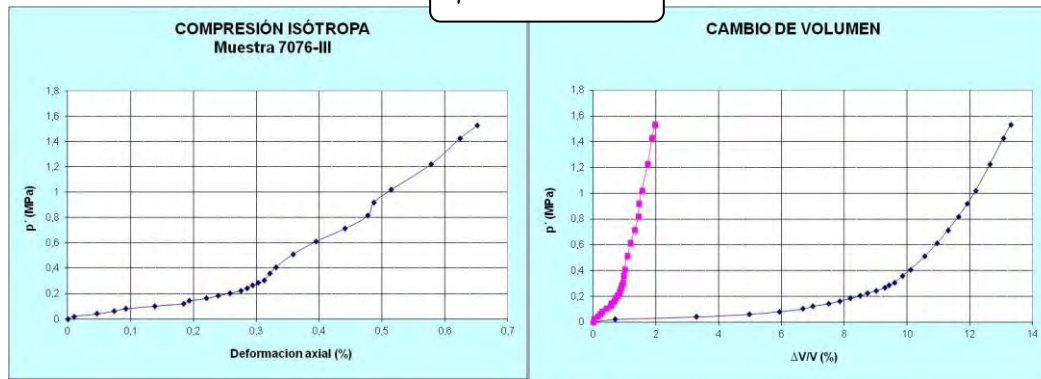


A-1.5.1.15.2.2 Muestra 7076-I.

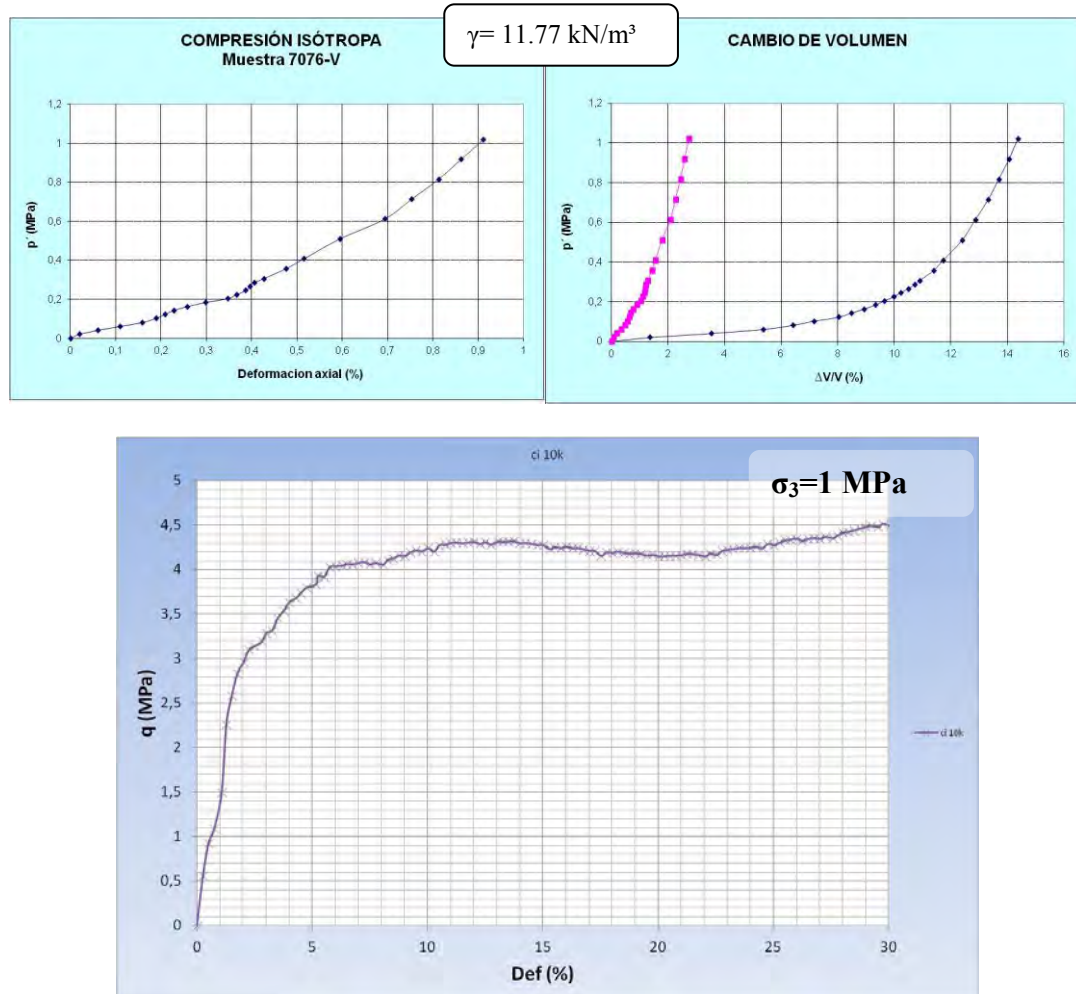


A-1.5.1.15.2.3 Muestra 7076-III.

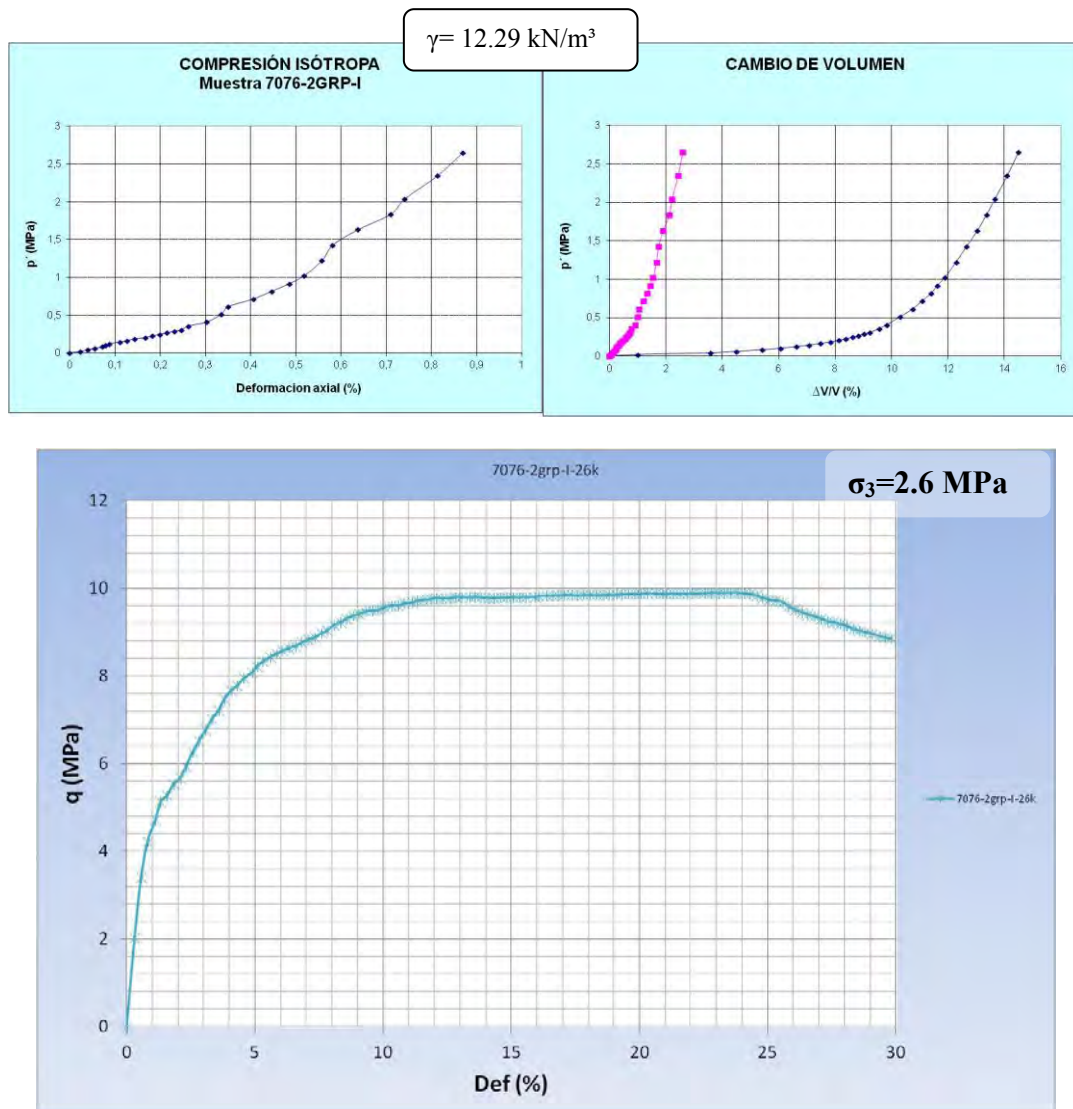
$$\gamma = 12.48 \text{ kN/m}^3$$



A-1.5.1.15.2.4 Muestra 7076-V.



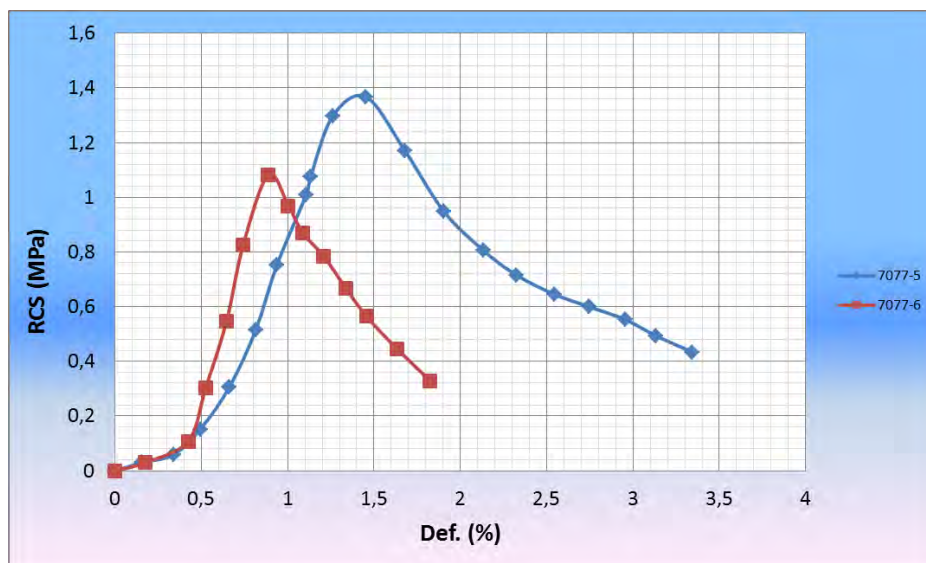
A-1.5.1.15.2.5 Muestra 7076-I 2grupo.



A-1.5.1.16 LPT-M. 7077.

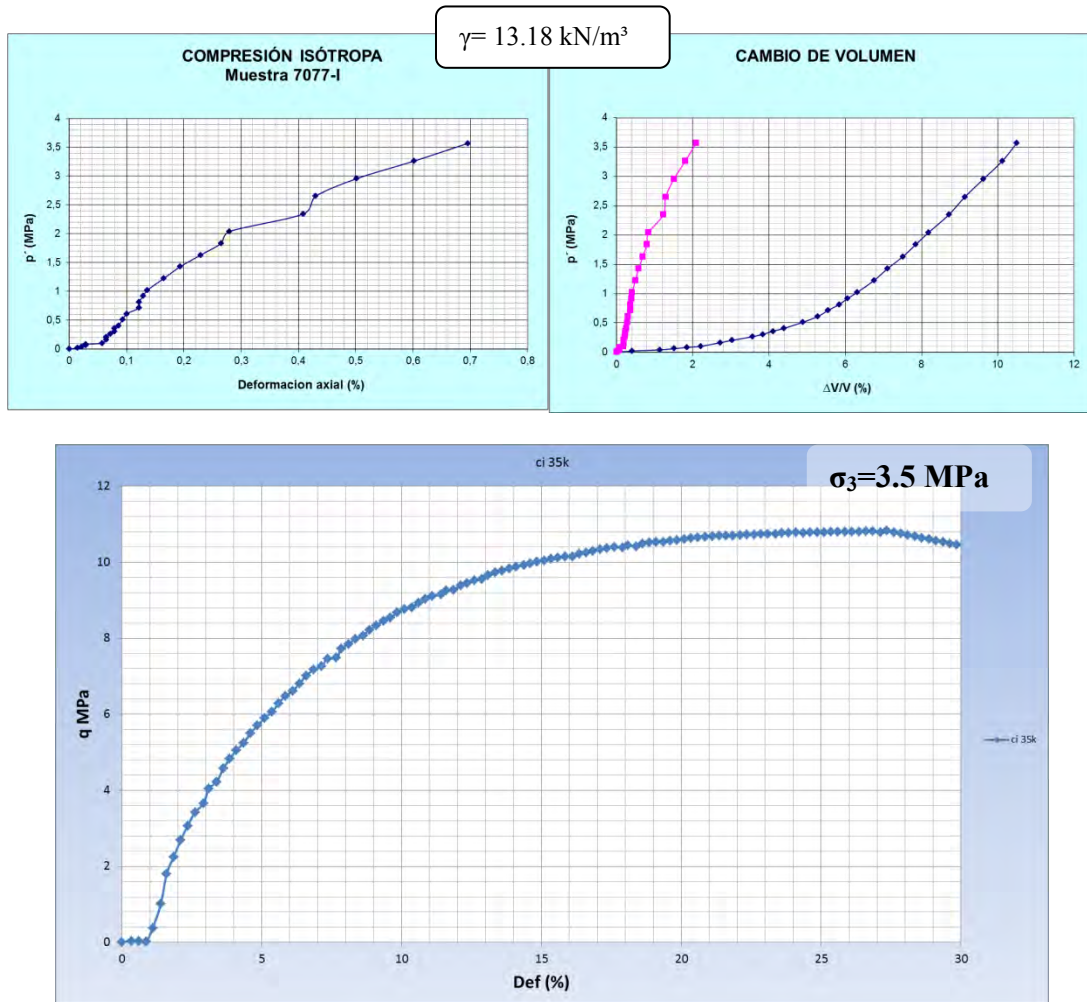


A-1.5.1.16.1 ENSAYO CSP.

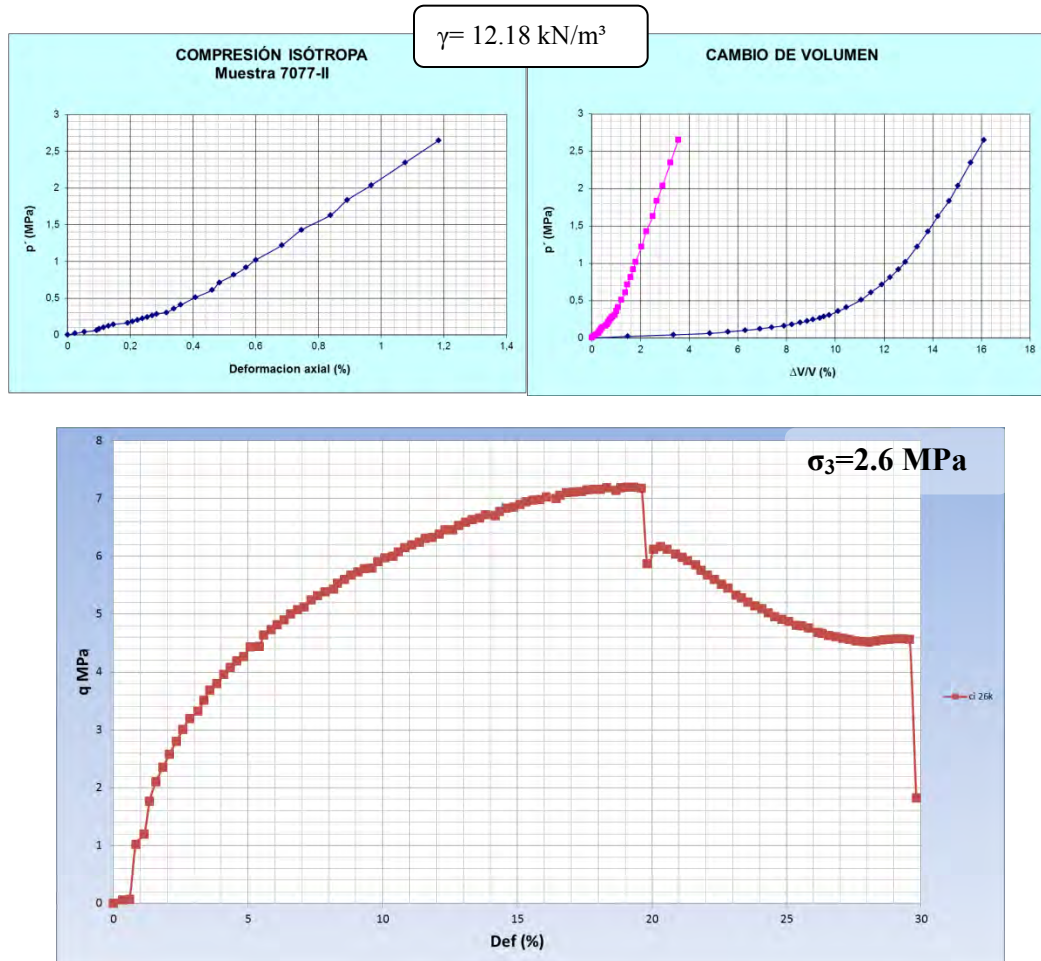


A-1.5.1.16.2 ENSAYO CI + TIS.

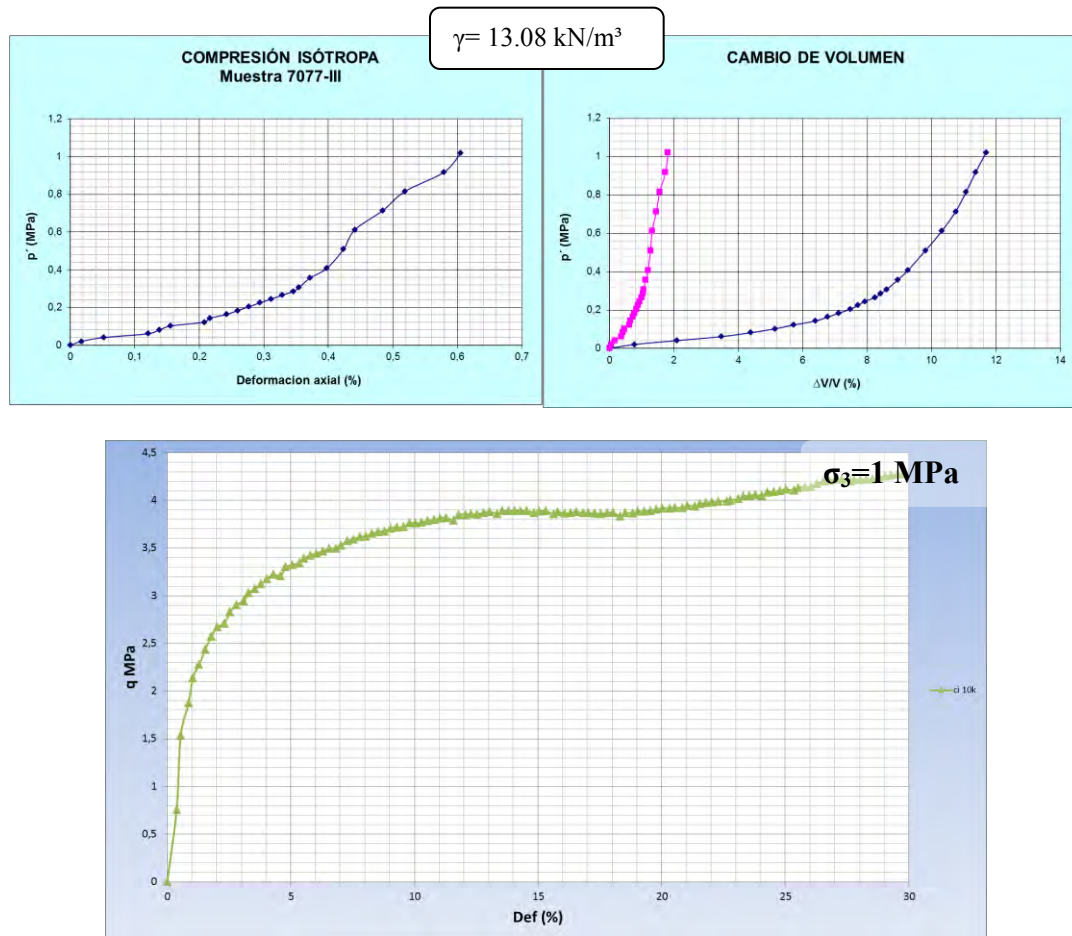
A-1.5.1.16.2.1 Muestra 7077-I.



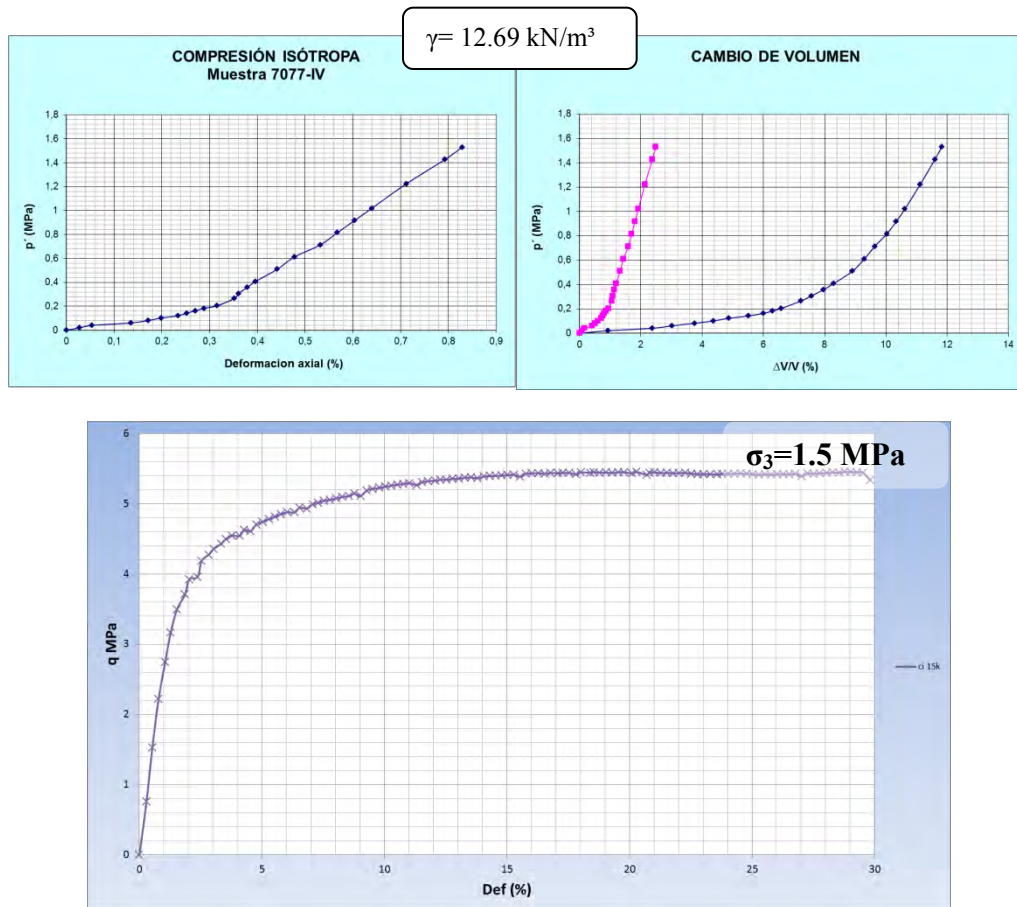
A-1.5.1.16.2 Muestra 7077-II.



A-1.5.1.16.2.3 Muestra 7077-III.



A-1.5.1.16.2.4 Muestra 7077-IV.



A-1.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS REALES

A-1.6.1 DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO MEDIANTE PICNÓMETRO DE GAS. (NORMA ASTM D5550-94)

A-1.6.1.1 Introducción

La determinación del peso específico relativo o densidad relativa de las partículas sólidas en un picnómetro (del griego puknos, "densidad"), se basa en el desplazamiento de volúmenes, es decir, lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido, basada en el principio de Arquímedes. El picnómetro es un recipiente de volumen estable que se llena con un fluido de densidad conocida. Cuando posteriormente se introduce la muestra cuya densidad o peso específico se quiere conocer, ésta desplaza un cierto volumen de fluido. El volumen de fluido desplazado, generalmente determinado por la diferencia de peso del conjunto, equivale al volumen de la muestra objeto de estudio. Conocida la masa o el peso de la muestra con gran exactitud, es posible calcular su densidad o su peso específico respectivamente, independientemente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en bloque o en polvo.

Todos los picnómetros de gas, al igual que el picnómetro de agua, se basan en el desplazamiento de volúmenes, es decir, lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido. Si, además de medir el volumen con la mayor precisión posible se conoce su masa también con bastante exactitud, es posible calcular su densidad real en g/cm^3 , cuyo valor numérico equivale al peso específico relativo. La característica adicional del picnómetro de gas es que funciona con gases ideales potencialmente no reactivos con la superficie de las partículas sólidas. Por ello, esta técnica es independiente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en estado sólido o polvo.

Las propiedades de los materiales geológicos que determinan su comportamiento en el picnómetro, tanto de agua como de gas, son su red porosa, superficie específica y tamaño de partícula, así como los fenómenos de interacción que se producen entre la superficie de las mismas y el fluido del picnómetro. Por ello, la diferencia fundamental entre el picnómetro de agua y el picnómetro de gas radica en las propiedades físico-químicas de los dos fluidos utilizados: tamaño molecular, energía de hidratación y capacidad de adsorción, fundamentalmente debidas a fuerzas de tipo dipolo o van der Waals.

A-1.6.1.1.1 Picnometría de agua

El diámetro molecular del agua es 0,276 nm (Hersh, 1961). Aunque el tamaño

molecular es muy ligeramente superior al del helio, su polaridad es notablemente superior. Además, la penetración de las moléculas de agua en el interior de los poros más pequeños se complica y ralentiza debido a la fuerte interacción que se produce entre éstas y la superficie de las partículas. Una penetración incompleta en los poros de la muestra puede llevar a un valor de peso específico relativo menor que su valor real (G), que puede incrementarse con el tiempo mediante sucesivas mediciones en las cuales el agua ha penetrado cada vez más. El tiempo necesario para la completa penetración del agua en la muestra es mayor cuanto menor es el tamaño de partícula y mayor el tamaño de la muestra analizado.

El picnómetro de agua no es recomendable en los casos en que la muestra de suelo contiene cualquier tipo de materia soluble en agua.

A-1.6.1.1.2 Picnometría de helio

Los átomos de Helio son esféricos, de diámetro 0,20-0,23 nm (Hersh, 1961; Bond and Spencer, 1958) y no presentan fuerzas de van der Waals, lo que se traduce en una prácticamente nula capacidad de adsorción en la superficie de los sólidos (Franklin, 1949). En consecuencia, los átomos de helio pueden penetrar en poros de tamaño inferior a los 0,3 nm (Van Krevelan, 1961).

Además de su tamaño y de no interaccionar con la superficie de los sólidos, el Helio cumple la Ley de los Gases Ideales y, en caso de mantener la cantidad de gas y la temperatura constante durante todo el ensayo, también cumple la Ley de Boyle-Mariotte. Ello permite correlacionar de una manera inmediata la presión a la que está sometido el gas y el volumen que ocupa. Con las debidas operaciones previas de calibración, es posible calcular el volumen de cualquier sólido que comparta con el Helio una cámara de volumen conocido.

Por ello, el helio es un gas apropiado para calcular el verdadero volumen del esqueleto sólido de los suelos.

A-1.6.1.2 Fundamentos de la picnometría de helio

El picnómetro de Helio del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX la caída de presión producida cuando a un gas sometido a una presión conocida en el interior de una cámara junto con la muestra estudiada (*cámara o célula portamuestras*) se le permite fluir a otra cámara (*cámara o célula de expansión*), ambas de volumen conocido (Fig. Anejo 1.1). Esta caída de la presión es proporcional al volumen de la muestra estudiada.

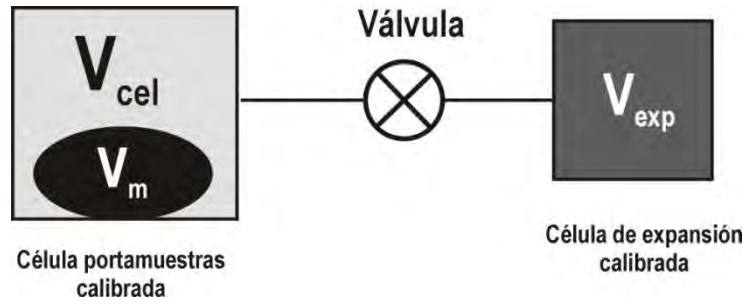


Fig. Anejo 1.1: Esquema del interior de un picnómetro de Helio.

Asumiendo que tanto la célula porta-muestras (V_{cel}) como la célula de expansión (V_{exp}) se encuentran a presión atmosférica (P_a) y temperatura ambiente (T^a), se cierra la válvula que las conecta y se incrementa la presión de la célula porta-muestras (con la muestra en el interior (V_m)) hasta un valor P_1 (134,45 KPa aproximadamente) permitiendo posteriormente que se equilibre el sistema (Tasa de equilibrio: 0,0345 KPa/min.). Entonces se registra y calcula el volumen de la muestra a partir de la ecuación de los gases ideales ya que de esta ecuación se conocen todos los parámetros incluyendo el volumen de la célula porta-muestras:

$$P_1 \cdot (V_{cel} - V_m) = n_c \cdot RT^a \quad (17)$$

Donde R es la Constante de Avogadro: $0,082 \text{ atm} \cdot \text{L} / \text{K} \cdot \text{mol}$

n_c es el número de moles de Helio en la célula portamuestras

De igual forma, para la célula de expansión: $P_a V_{exp} = n_c RT^a$

Al abrir la válvula que conecta ambas cámaras, la presión cae hasta un valor P_2 y la ecuación que expresa este fenómeno es:

$$\begin{aligned} P_2 (V_{cel} - V_m + V_{exp}) &= n_c RT^a + n_c RT^a \\ P_2 (V_{cel} - V_m + V_{exp}) &= P_1 (V_{cel} - V_m) + P_a V_{exp} \\ P_2 (V_{cel} - V_m) &= (P_a - P_2) V_{exp} \\ V_{cel} - V_m &= [(P_a - P_2) / (P_2 - P_1)] V_{exp} \end{aligned} \quad (18)$$

Sumando y restando P_a en el denominador:

$$V_{cel} - V_{sam} = \frac{(P_a - P_2)}{P_2 - P_1 + P_a - P_a} \cdot V_{exp} = \frac{(P_a - P_2)}{(P_2 - P_a) - (P_1 - P_a)} \cdot V_{exp} \quad (19)$$

Dividiendo entre $(P_a - P_2)$ en numerador y denominador:

$$V_{cel} - V_{sam} = \frac{P_a - P_2}{(P_2 - P_a) - (P_1 - P_a)} \cdot V_{exp} = \frac{V_{exp}}{-1 - \frac{P_1 - P_a}{P_2 - P_a}} = \frac{V_{exp}}{\frac{P_1 - P_a}{P_2 - P_a} - 1} \quad (20)$$

donde $\left\{ \begin{array}{l} P_1 - P_a = P_{1g} \\ P_2 - P_a = P_{2g} \end{array} \right\}$ Presiones manométricas: referidas a la P. atmosférica

Entonces:

$$V_{cel} - V_{sam} = \frac{V_{exp}}{\frac{P_{1g}}{P_{2g}} - 1} \Rightarrow V_{cel} = V_{sam} + \frac{V_{exp}}{\frac{P_{1g}}{P_{2g}} - 1} \text{ Ecuación del picnómetro (21)}$$

Las determinaciones deben repetirse al menos tres veces, siendo necesario hacerlo más veces si los valores de γ_s difieren más de 0,03. Sin embargo el número de determinaciones que se pueden realizar sucesivamente sin parada viene limitada por la generación de calor en el transductor de presiones, ya que ello viola la premisa de que la temperatura es constante en la célula portamuestras y provoca una deriva del valor medido de γ_s .

Se determina la densidad relativa o peso específico relativo del suelo mediante la ecuación:

$$G = \frac{M_s / V_s}{\rho_w} \quad (22)$$

donde:

M_s : Masa de suelo medida antes de introducirla en el picnómetro, en gramos

V_s : Volumen de muestra

ρ_w : Densidad del agua destilada a 4°C (1 g/cm³)

A-1.6.1.3 Descripción del equipo.

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX cuenta con un picnómetro de Helio Modelo Accupyc 1330 TM de la casa MICROMERITICS (Fig. Anejo 1.2).



Fig. Anejo 1.2: Picnómetro de Helio. Modelo Accupyc 1330

El equipo cuenta con una cámara portamuestras de 100 cm³. Los ensayos que se realicen en este equipo deben presentar una reproducibilidad dentro de 0,01% del volumen total de la cámara o del 0,02% del volumen total de la muestra introducida, en estado limpio, seco y en equilibrio térmico. La precisión se encuentra dentro del 0,03% de la lectura + 0,03% del volumen total de la cámara portamuestras.

Es capaz de determinar densidades con una resolución de 0,0001 g/cm³, gracias a una calibración ultraprecisa que se realiza con un volumen estándar de calibración consistente en una bola de acero que presenta un volumen, una esfericidad y un diámetro certificados mediante su correspondiente certificado de calibración (Fig. Anejo 1.3).

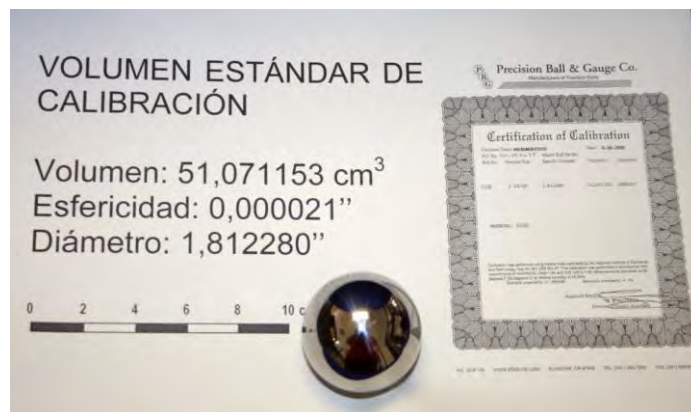


Fig. Anejo 1.3: Volumen estándar y su correspondiente certificado de calibración.

El requisito más importante de este tipo de picnómetro es un depósito de Helio de calidad certificada, a la presión descrita por el fabricante del picnómetro. El Helio es el gas idóneo para realizar este ensayo ya que es un gas noble que no interactúa con las partículas del suelo y es capaz de penetrar en los poros más pequeños. El picnómetro usa Helio con una pureza de al menos 99,995% .

La botella de Helio debe:

Tener una presión mínima de 13,7895 bar = 1378,95 kPa (200 psi)

Tener un regulador en el rango 1,0342 – 1,5858 bar; 103,42 – 158,58 kPa (15-23 psi).

A-1.6.1.4 Procedimiento experimental

Las determinaciones del peso específico relativo de las partículas mediante picnómetro de Helio se realizan según lo recomendado en la norma americana **ASTM núm. D 5550-06: “Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer”**, con algunas modificaciones propuestas por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX a raíz de la experiencia adquirida durante los años de estudios con este equipo.

A-1.6.1.4.1 Preparación de muestras

Tamizado de la muestra: La norma D 5550-06 no especifica el tamiz ni el tamaño de partícula idóneo para este ensayo. El CEDEX somete a las muestras a un machaqueo y tamizado por el tamiz UNE 0,080 (tamaño de partícula inferior a 80 μm) en todos los casos.

Secado de la muestra: Las muestras se deben secar en un horno o estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta pesada constante para eliminar el agua higroscópica. Debe tenerse especial precaución con los minerales sensibles a la temperatura como algunos sulfatos o minerales arcillosos, ya que el calentamiento puede alterar su estructura. Se puede secar a una temperatura menor pero debe estudiarse el efecto de la misma en la presencia de agua higroscópica en la muestra.

Enfriamiento en un desecador: El tiempo que la muestra permanece en el desecador debe ser el mínimo posible, sobre todo si ésta es higroscópica. La muestra nunca debe estar más caliente que la temperatura ambiente durante un análisis, ya que la temperatura afecta fuertemente a los resultados. Por otro lado, la muestra nunca debe estar expuesta al aire, incluso en el interior del desecador, más tiempo del imprescindible para conseguir el equilibrio térmico por el peligro potencial de determinados minerales de absorber humedad ambiental, lo que provocaría cambios en la masa y el volumen.

Pesado de la muestra: Inmediatamente antes del análisis, debe pesarse la muestra registrando su peso (M_s) en gramos e introducirla en la celda portamuestras del picnómetro. Para ello es necesario contar con una balanza analítica de 200 g. de rango y 0,0001 g. de precisión.

A-1.6.1.4.2 Determinación del peso específico

En el momento de introducir la muestra en el recipiente portamuestras, será necesario prestar especial atención a los siguientes puntos:

Llenado del recipiente portamuestras: Se debe llenar, para una mayor precisión,

como mínimo 2/3 de la capacidad máxima del recipiente portamuestras, siendo aconsejable ocupar entre un 80-90% del mismo.

Purgado: Antes de realizar el análisis, es necesario eliminar los gases que se encuentren en el interior de los poros de la muestra mediante purgado con Helio. Generalmente se realiza una secuencia de 30 purgas previas a la determinación del peso específico relativo.

Determinaciones: En general se realizan 25 análisis para calcular a continuación el valor promedio y la desviación estándar de las mismas.

Precisión del análisis: Atendiendo a criterios de calidad en función de la repetibilidad, no se considerarán valores de peso específico relativo repetidos por el mismo operador que difieran en más de 0,02.

En la Tabla A.1-3, se muestra los valores promedios obtenidos mediante el picnómetro de gas.

Tabla A.1-3: Peso específico de las partículas, en MPa, obtenidos en el ensayo del picnómetro de Helio.

Nº MUESTRA	PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTICULAS
	VALOR PROMEDIO CON DESV. EST. 0.001
6630	27,72
6631	25,74
6632	26,09
6633	23,82
6634	23,66
6635	24,27
6636	24,04
6637	25,12
6638	22,62
7066	29,60
7067	30,79
7068	27,72
7069	25,78
7070	27,01
7071	29,02

N° MUESTRA	PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTICULAS
	VALOR PROMEDIO CON DESV. EST. 0.001
7072	27,46
7073	27,98
7074	29,31
7075	30,70
7076	27,30
7077-A	26,76
7077-B	28,06
7078	30,24
7079	29,08
7080	27,21

A-1.6.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONATOS, SULFATOS SOLUBLES, MATERIA ORGÁNICA Y PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN

A-1.6.2.1 Procedimiento experimental

El contenido total de carbonatos, sulfatos solubles y materia orgánica presentes en las muestras estudiadas se determinó según los procedimientos indicados en la Normas UNE 103200:1993, UNE 103201:1996 y UNE 103204:1993. La determinación de la pérdida total de peso por calcinación de las muestras se realizó según el método de la Norma UNE-EN 196-2:2006, relativa a los métodos de análisis químico de cementos.

A-1.6.2.1.1 Determinación del contenido de elementos analizados

En la Tabla A.1-4 se muestran los contenidos determinados de carbonatos, sulfatos solubles, materia orgánica y sales solubles, respectivamente expresados en tanto por ciento en peso de CO_2 y CaCO_3 , SO_3 y M.O., así como en su caso las pérdidas sufridas por calcinación, expresadas en tanto por ciento del peso total de la muestra.

Tabla A.1-4: Contenidos de carbonatos, sulfatos solubles, materia orgánica y sales solubles, en las muestras estudiadas.

Muestra	Carbonatos		SO ₃ ⁽³⁾ (%)	M.O. ⁽⁴⁾ (%)
	CO ₂ ⁽¹⁾ (%)	CaCO ₃ ⁽²⁾ (%)		
6630	3,1	7,1	0,15	0,11
6631	6,6	14,9	0,19	0,05
6632	7,3	16,7	0,08	0,05
6633	4,0	9,1	0,10	0,34
6634	5,6	12,7	0,14	0,17
6635	5,8	13,2	0,12	0,16
6636	4,9	11,2	0,09	0,08
6637	1,7	3,9	0,11	0,11
6638	2,7	6,1	0,11	0,17
7066	1,4	3,2	0,16	0,14
7067	1,3	2,9	0,19	0,16
7068	1,2	2,8	0,19	0,16
7069	2,6	6,0	0,16	0,11
7070	1,7	3,8	0,19	0,11
7071	2,5	5,8	0,14	0,08
7072	4,2	9,5	0,15	0,14
7073	1,6	3,6	0,17	0,05
7074	0,1	0,2	0,16	0,16
7075	0,1	0,3	0,16	0,05
7076	1,0	2,3	0,19	0,13
7077-A	0,8	1,9	0,23	0,16
7077-B	0,8	1,7	0,19	0,13
7078	1,3	3,0	0,19	0,11
7079	0,7	1,6	0,17	0,08
7080	0,6	1,4	0,18	0,16
Cenizas	0,3	0,9	0,24	0,16

⁽¹⁾ Contenido total de carbonatos expresado como dióxido de carbono

⁽²⁾ Contenido total carbonatos expresado como carbonato cálcico

⁽³⁾ Contenido total de sulfatos solubles en agua (multiplicar por 2,151 para expresar como yeso)

⁽⁴⁾ Contenido total de materia orgánica

A-1.6.3 CONTENIDO DE ÓXIDOS Y ELEMENTOS MAYORITARIOS EN MUESTRA, DETERMINADO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

A-1.6.3.1 Fundamento teórico

Dentro de los métodos físicos empleados para la caracterización de materiales sólidos, las técnicas espectrométricas basadas en la utilización de los rayos-X, entre las que se encuentra la fluorescencia de rayos X (XRF), constituyen un grupo especialmente importante, tanto por variedad de información que proporcionan como por la importancia de ésta.

La técnica espectrométrica de XRF permite medir la intensidad de la energía electromagnética emitida por los átomos que componen una muestra que han sido previamente excitados con un haz de rayos X, emisión producida por las transiciones atómicas que se dan entre diferentes niveles de energía. La radiación X incidente es parcialmente atenuada por el material irradiado; es decir, sólo una cierta fracción de la intensidad de esta radiación atraviesa la muestra sin que se produzcan cambios en su energía o longitud de onda. A continuación se da la definición de las etapas de excitación y de emisión atómica.

- 1) **Excitación:** El choque de un electrón o fotón X incidente con un electrón de las capas internas del átomo, produce la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en estado de excitado.
- 2) **Emisión:** El átomo en estado excitado tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones de niveles más externos para cubrir el hueco producido. En este proceso hay un desprendimiento de energía, igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X.

En la Fig. Anejo 1.4 se muestran ambas etapas.

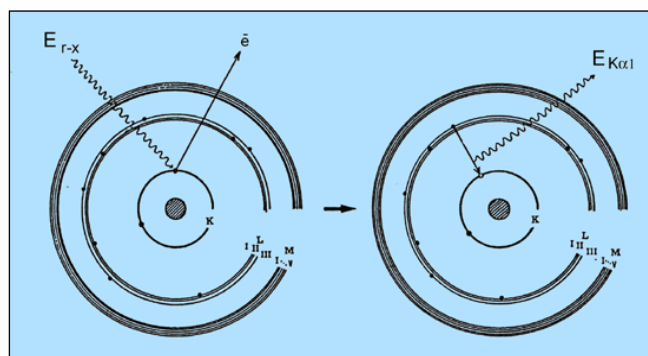


Fig. Anejo 1.4: Etapas de excitación y emisión atómica en la técnica de XRF

Las energías de los niveles electrónicos son características para cada tipo de átomos, por lo que la radiación X emitida es característica para cada elemento y, en principio, no dependerá de la sustancia química en la que se encuentre, ya que, en general, estas radiaciones están originadas por transiciones entre los niveles electrónicos internos, cuyas energías no se ven afectadas por el tipo de enlace existente. En la Fig. Anejo 1.5 se muestran las diversas transiciones atómicas que generan el fenómeno de fluorescencia de rayos X.

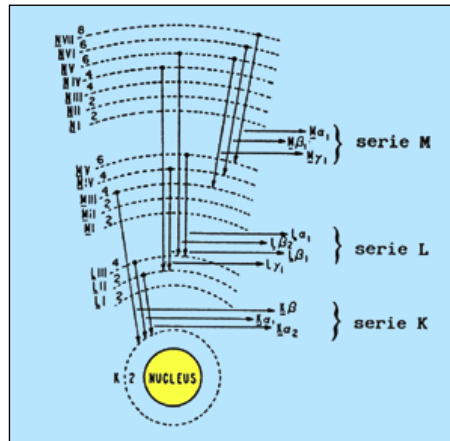


Fig. Anejo 1.5: Transiciones atómicas de fluorescencia de rayos X

Cuando la energía incidente es mayor o igual que la energía del nivel atómico K, puede producirse la expulsión de un electrón de esta capa K. Las transiciones desde niveles superiores dan lugar a una serie de radiaciones características de longitudes de ondas similares que constituyen la serie K ($K\alpha$, $K\beta$, etc.), la cual es la serie de mayor energía y de menor longitud de onda. Si la vacante se produce en alguno de los subniveles de la capa L, las transiciones desde niveles superiores dan lugar a las radiaciones características de la serie L ($L\alpha$, $L\beta$, etc.). Lo mismo puede decirse para la capa M.

Aunque el número de radiaciones características posibles para cada elemento es grande, la intensidad de la mayoría de ellas es muy pequeña, con una probabilidad muy pequeña de que se produzcan, y no pueden ser registradas. Por otra parte, el número de radiaciones medidas se simplifica, ya que algunas presentan entre sí una diferencia de energías tan pequeña que aparecen juntas. Es por ello que la técnica de XRF ofrece las siguientes ventajas:

- Tener un amplio campo de aplicación, ya que es aplicable a cualquier elemento químico con número atómico mayor que 4 (berilio), aunque en los espectros comerciales la zona de aplicación está limitada hasta el número atómicos 9 (flúor).
- Relativa simplicidad del espectro de emisión de rayos-X, ya que en general

cada elemento presenta pocas líneas y su posición no depende del tipo de compuesto en el que se encuentre el elemento.

- No existen prácticamente interferencias espectrales, y en caso de existir hay muchas formas de evitarlas o corregirlas.

A-1.6.3.2 Campo de aplicación de la XRF

El campo de aplicación de la técnica de XRF es muy amplio y engloba la Ciencia de Materiales, Química Inorgánica, Cristalografía, Mineralogía, Geología, Química Analítica, Edafología, Química Industrial, Metalurgia, Cerámica y Materiales de Construcción, Arqueología, Ciencias Ambientales, etc.

La fluorescencia de rayos X es una técnica muy versátil, ya que las muestras analizadas pueden estar en forma de sólidos, pastillas, polvos y películas finas. El material del que está compuesto puede ser metal, mineral, cerámico, vidrio, plástico, tela, papel o prácticamente de cualquier tipo, y la forma y tamaño de las muestras pueden ser muy variables. Por otra parte, el método de XRF puede ser aplicado en condiciones especiales como altas y bajas temperaturas, atmósferas especiales, muestras con cierto grado de humedad, etc.

A-1.6.3.3 Sistema XRF empleado

La identificación mediante XRF de la longitud de onda o energía de cada una de las radiaciones características previamente citadas, permite conocer los elementos que componen la muestra, mientras que la medida de sus intensidades mediante XRF permite conocer las respectivas concentraciones de estos elementos.

El sistema empleado para el análisis químico de las muestras estudiadas en el presente trabajo es un espectrómetro de fluorescencia de rayos X PANalytical Axios Mineral, con dispersión de longitud de onda y equipado con un generador de rayos X de alta potencia (4kW). En la Foto Anejo 1.1 se muestra el equipo de XRF del Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).



Foto Anejo 1.1: Sistema de XRF empleado para el análisis de las muestras

En este sistema, la muestra es inicialmente excitada con un haz de radiación generado por un tubo de rayos X, y el espectro de fluorescencia policromático emitido es descompuesto en sus componentes monocromáticas en función de sus longitudes de onda, tras difractarse en un monocristal de espaciado conocido. El haz difractado para cada posición angular del monocristal incide sobre un sistema de detección compuesto por un detector de gas proporcional de flujo y otro de centelleo desacoplados, los cuales convierten los fotones recibidos en impulsos eléctricos. En la Fig. Anejo 1.6: Esquema de sistema típico de XRF con dispersión de longitudes de onda se muestra el esquema de un espectrómetro convencional de fluorescencia de rayos X con dispersión de longitudes de onda.

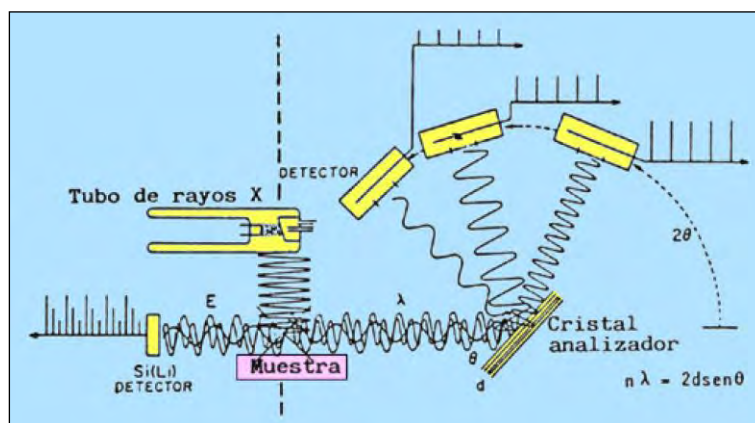


Fig. Anejo 1.6: Esquema de sistema típico de XRF con dispersión de longitudes de onda

De acuerdo con la ley de Bragg (Ecuación 1), midiendo el valor del ángulo (θ) al que se difracta cada una de las radiaciones que constituyen el espectro emitido por la muestra, se puede calcular la longitud de onda (λ) de cada una, ya que es conocido el espaciado del cristal analizador (d). Del análisis de estas longitudes de onda se puede

conocer la composición cualitativa ó semicuantitativa de la muestra, mientras que la medida de su intensidad nos da la composición cuantitativa.

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Ecuación 1

La precisión del sistema de este sistema de WD-XRF fue obtenida tras comparar los resultados del análisis de materiales de referencia de naturaleza geológica y sus valores certificados, es mayor o igual al 95%. Este sistema también presenta una elevada repetitividad entre medidas realizadas a la misma muestra, con una dispersión de valores generalmente inferior al 1% del valor medio.

En la siguiente tabla se muestran los límites de detección (LLD) que el equipo de WD-XRF muestra en la determinación de óxidos y elementos mayoritarios en muestras de naturaleza geológica.

Tabla 1.5: Límites de detección del sistema WD-XRF para la determinación del contenido de óxidos y elementos mayoritarios en muestras geológicas

Compuesto	LLD* medio (mg kg ⁻¹)	LLD* medio (%)	Elemento	LLD* medio (mg kg ⁻¹)	LLD* medio (%)
Al ₂ O ₃	77	0,01	Al	41	0,004
CaO	15	0,002	Ca	11	0,001
Fe ₂ O ₃	8	0,001	Fe	6	0,001
K ₂ O	10	0,001	K	8	0,001
MgO	51	0,005	Mg	31	0,003
MnO	8	0,001	Mn	6	0,001
Na ₂ O	88	0,01	Na	65	0,006
P ₂ O ₅	13	0,001	P	6	0,001
SO ₃	22	0,002	S	9	0,001
SiO ₂	63	0,006	Si	30	0,003
TiO ₂	20	0,002	Ti	12	0,001
Ba	36	0,004	Ba	36	0,004
Cr	11	0,001	Cr	11	0,001
Pb	12	0,001	Pb	12	0,001
Sr	5	0,001	Sr	5	0,001
Zn	5	0,001	Zn	5	0,001
Zr	5	0,001	Zr	5	0,001
Cl	34	0,003	Cl	34	0,003
F	360	0,04	F	400	0,04

*LLD: Límite de detección

*LLD: Límite de detección

De esta tabla se concluye que los LLD para la determinación de óxidos y de elementos mayoritarios son iguales o inferiores al 0,01% y 0,06% de proporción en muestra, respectivamente.

A-1.6.3.4 Determinación del contenido de óxidos y elementos mayoritarios

Las muestras se prepararon según la Norma UNE 103100:1995 relativa al cuarteo, machaqueo y tamizado de muestras de laboratorio. Par ello se separaron por cuarteo 500 g de cada una de las muestras y a continuación se procedió a su tamizado por el tamiz UNE 0,08.

Las muestras ya cuarteadas y tamizadas se secaron en estufa a 40°C durante 24 h. Se tomaron 100 g de cada muestra seca y se guardaron en un bote de polipropileno de 100 ml de capacidad, que se cerró con tapa hermética de polipropileno para evitar posibles contaminaciones y conservar adecuadamente cada uno de los materiales preparados.

Para determinar en el sistema XRF el contenido total de elementos y óxidos mayoritarios presentes en las muestras ya tamizadas, fue necesario la fabricación de perlas de muestra de 35 mm de diámetro. Es por esta razón que las muestras se mineralizaron mediante fusión alcalina, donde 0,5 g de muestra se mezclaron con 8,5 g de metaborato-tetraborato de litio (2:3 en peso) y 0,02 g de bromuro de litio. Esta fusión se realizó en un crisol de Pt mediante el empleo de una perladora de inducción magnética PERL`X 3 (Foto Anejo 1.2), que permitió la preparación de las perlas de muestra.



Foto Anejo 1.2: Sistema empleado para fabricar perlas de muestra

En las siguientes tablas se muestran los contenidos presentes en las muestras estudiadas de aluminio, calcio, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, fósforo, azufre, silicio y titanio, expresados como tanto por ciento en muestra de elemento y de su óxido correspondiente (valores entre paréntesis), forma química en la que generalmente se encuentran estos elementos en muestras geológicas u otro tipo de materiales (cenizas volantes, escorias, materiales cerámicos o vidrios, entre otros).

En estas tablas también se muestran los contenidos de los elementos Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F expresados en tanto por ciento en peso de muestra, así como la pérdida

total de peso sufrida por calcinación de la muestra ó L.O.I. (“*Lost On Ignition*”), durante una hora a 950°C en horno de mufla, según el procedimiento desarrollado en la Norma UNE-EN 196-2 (2006). Esta disminución de peso suele estar debida a la pérdida en la calcinación de H₂O, CO₂ (fundamentalmente procedente de carbonatos) y materia orgánica presentes en la muestra. El balance de masas de la muestra resulta de la suma de la L.O.I. y de los óxidos y elementos mayoritarios, y es indicativo de la calidad del análisis de los componentes mayoritarios contenidos en muestras mineralógicas, ya que cuando este parámetro es de 100% ± 1%, el análisis cuantitativo es de alta calidad.

A-1.6.4 Resultados obtenidos

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6630 Análisis: 19-dic-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,039 (15,197)
Ca (CaO)	6,242 (8,742)
Fe Fe ₂ O ₃	8,947 (12,799)
K (K ₂ O)	1,559 (1,878)
Mg (MgO)	2,994 (4,966)
Mn (MnO)	0,166 (0,214)
Na (Na ₂ O)	2,880 (3,881)
P (P ₂ O ₅)	0,442 (1,012)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	20,198 (43,159)
Ti (TiO ₂)	2,299 (3,832)
Ba	0,07
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,09
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,03
F	0,10
Parámetro	(%)
L.O.I.*	4,00
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6631 Análisis: 25-nov-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,678 (16,405)
Ca (CaO)	6,869 (9,621)
Fe Fe ₂ O ₃	8,311 (11,890)
K (K ₂ O)	1,501 (1,808)
Mg (MgO)	2,135 (3,541)
Mn (MnO)	0,136 (0,176)
Na (Na ₂ O)	2,231 (3,007)
P (P ₂ O ₅)	0,422 (0,966)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	17,059 (36,451)
Ti (TiO ₂)	2,164 (3,607)
Ba	0,06
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,09
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	< 0,01
F	0,25
Parámetro	(%)
L.O.I.*	12,10
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6632 Análisis: 25-nov-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	7,699 (14,554)
Ca (CaO)	6,588 (9,227)
Fe Fe ₂ O ₃	6,204 (8,875)
K (K ₂ O)	2,175 (2,620)
Mg (MgO)	1,932 (3,204)
Mn (MnO)	0,141 (0,182)
Na (Na ₂ O)	2,457 (3,311)
P (P ₂ O ₅)	0,314 (0,718)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,640 (39,830)
Ti (TiO ₂)	1,561 (2,601)
Ba	0,06
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,02
Cl	< 0,01
F	0,19
Parámetro	(%)
L.O.I.*	14,60
Balance**	100,07

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6633 Análisis: 25-nov-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,220 (15,539)
Ca (CaO)	3,361 (4,707)
Fe Fe ₂ O ₃	3,241 (4,636)
K (K ₂ O)	2,635 (3,175)
Mg (MgO)	1,927 (3,195)
Mn (MnO)	0,112 (0,145)
Na (Na ₂ O)	2,972 (4,005)
P (P ₂ O ₅)	0,069 (0,158)
S (SO ₃)	0,008 (0,019)
Si (SiO ₂)	22,870 (48,868)
Ti (TiO ₂)	0,641 (1,068)
Ba	0,04
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,03
Zn	0,01
Zr	0,08
Cl	0,12
F	0,31
Parámetro	(%)
L.O.I.*	13,90
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6634 Análisis: 19-dic-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	9,494 (17,947)
Ca (CaO)	2,096 (2,936)
Fe Fe ₂ O ₃	2,100 (3,005)
K (K ₂ O)	4,539 (5,469)
Mg (MgO)	1,347 (2,234)
Mn (MnO)	0,115 (0,148)
Na (Na ₂ O)	4,414 (5,949)
P (P ₂ O ₅)	0,046 (0,105)
S (SO ₃)	0,014 (0,034)
Si (SiO ₂)	23,481 (50,173)
Ti (TiO ₂)	0,371 (0,618)
Ba	0,04
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,03
Zn	0,01
Zr	0,10
Cl	0,11
F	0,20
Parámetro	(%)
L.O.I.*	10,90
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6635 Análisis: 25-nov-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,095 (15,302)
Ca (CaO)	4,810 (6,736)
Fe Fe ₂ O ₃	3,735 (5,343)
K (K ₂ O)	1,908 (2,299)
Mg (MgO)	2,501 (4,147)
Mn (MnO)	0,112 (0,145)
Na (Na ₂ O)	1,835 (2,473)
P (P ₂ O ₅)	0,037 (0,085)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	21,634 (46,226)
Ti (TiO ₂)	0,722 (1,204)
Ba	0,04
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,04
Zn	0,01
Zr	0,07
Cl	0,04
F	0,24
Parámetro	(%)
L.O.I.*	15,60
Balance**	100,00

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6636 Análisis: 25-nov-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	9,336 (17,649)
Ca (CaO)	3,772 (5,283)
Fe Fe ₂ O ₃	3,718 (5,319)
K (K ₂ O)	2,097 (2,526)
Mg (MgO)	2,183 (3,621)
Mn (MnO)	0,115 (0,148)
Na (Na ₂ O)	1,921 (2,589)
P (P ₂ O ₅)	0,038 (0,088)
S (SO ₃)	0,009 (0,022)
Si (SiO ₂)	21,838 (46,662)
Ti (TiO ₂)	0,710 (1,184)
Ba	0,04
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,04
Zn	0,01
Zr	0,08
Cl	0,06
F	0,20
Parámetro	(%)
L.O.I.*	14,50
Balance**	100,02

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6637 Análisis: 19-dic-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,796 (12,847)
Ca (CaO)	4,773 (6,685)
Fe Fe ₂ O ₃	9,526 (13,628)
K (K ₂ O)	0,235 (0,283)
Mg (MgO)	4,179 (6,930)
Mn (MnO)	0,143 (0,184)
Na (Na ₂ O)	0,639 (0,861)
P (P ₂ O ₅)	0,203 (0,465)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,919 (40,426)
Ti (TiO ₂)	1,948 (3,247)
Ba	0,04
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,05
Zn	0,01
Zr	0,02
Cl	< 0,01
F	0,07
Parámetro	(%)
L.O.I.*	14,30
Balance**	100,07

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-6638 Análisis: 19-dic-11	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,588 (16,235)
Ca (CaO)	1,493 (2,091)
Fe Fe ₂ O ₃	1,855 (2,654)
K (K ₂ O)	3,673 (4,425)
Mg (MgO)	1,701 (2,821)
Mn (MnO)	0,095 (0,123)
Na (Na ₂ O)	3,137 (4,228)
P (P ₂ O ₅)	0,036 (0,083)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	22,704 (48,512)
Ti (TiO ₂)	0,314 (0,524)
Ba	0,03
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,03
Zn	0,01
Zr	0,09
Cl	0,04
F	0,12
Parámetro	(%)
L.O.I.*	18,00
Balance**	100,02

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7066 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	8,432 (15,939)
Ca (CaO)	5,693 (7,973)
Fe Fe ₂ O ₃	11,018 (15,763)
K (K ₂ O)	0,873 (1,052)
Mg (MgO)	3,537 (5,866)
Mn (MnO)	0,133 (0,172)
Na (Na ₂ O)	0,126 (0,170)
P (P ₂ O ₅)	0,217 (0,496)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,727 (40,016)
Ti (TiO ₂)	2,742 (4,570)
Ba	0,07
Cr	0,03
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,04
Cl	< 0,01
F	0,14
Parámetro	(%)
L.O.I.*	6,10
Balance**	98,48

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7067 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,366 (12,034)
Ca (CaO)	7,465 (10,455)
Fe Fe ₂ O ₃	10,184 (14,570)
K (K ₂ O)	1,116 (1,345)
Mg (MgO)	5,645 (9,361)
Mn (MnO)	0,152 (0,196)
Na (Na ₂ O)	2,491 (3,357)
P (P ₂ O ₅)	0,378 (0,865)
S (SO ₃)	0,316 (0,789)
Si (SiO ₂)	19,519 (41,707)
Ti (TiO ₂)	2,618 (4,363)
Ba	0,06
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,09
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	< 0,01
F	0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	0,70
Balance**	100,00

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de

** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7068 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,475 (12,240)
Ca (CaO)	6,033 (8,449)
Fe Fe ₂ O ₃	11,194 (16,015)
K (K ₂ O)	0,797 (0,960)
Mg (MgO)	5,182 (8,594)
Mn (MnO)	0,143 (0,184)
Na (Na ₂ O)	1,646 (2,219)
P (P ₂ O ₅)	0,406 (0,928)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,830 (40,236)
Ti (TiO ₂)	3,025 (5,042)
Ba	0,05
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,08
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,02
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	4,90
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de

** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7069 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,108 (11,546)
Ca (CaO)	4,451 (6,234)
Fe Fe ₂ O ₃	9,634 (13,783)
K (K ₂ O)	1,652 (1,990)
Mg (MgO)	5,027 (8,337)
Mn (MnO)	0,148 (0,191)
Na (Na ₂ O)	1,576 (2,124)
P (P ₂ O ₅)	0,331 (0,758)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	19,810 (42,329)
Ti (TiO ₂)	1,913 (3,188)
Ba	0,05
Cr	0,03
Pb	< 0,01
Sr	0,06
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	< 0,01
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	9,40
Balance**	100,06

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de

** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7070 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	5,823 (11,008)
Ca (CaO)	6,527 (9,142)
Fe Fe ₂ O ₃	9,350 (13,376)
K (K ₂ O)	1,121 (1,350)
Mg (MgO)	5,625 (9,329)
Mn (MnO)	0,142 (0,183)
Na (Na ₂ O)	1,546 (2,084)
P (P ₂ O ₅)	0,331 (0,757)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,779 (40,127)
Ti (TiO ₂)	2,255 (3,758)
Ba	0,05
Cr	0,03
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,01
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	8,70
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de

** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7071 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,282 (11,875)
Ca (CaO)	8,238 (11,538)
Fe Fe ₂ O ₃	10,187 (14,573)
K (K ₂ O)	0,960 (1,157)
Mg (MgO)	5,557 (9,215)
Mn (MnO)	0,150 (0,193)
Na (Na ₂ O)	2,039 (2,748)
P (P ₂ O ₅)	0,359 (0,821)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	18,807 (40,185)
Ti (TiO ₂)	2,633 (4,389)
Ba	0,05
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,08
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,03
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	3,10
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7072 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	5,244 (9,913)
Ca (CaO)	8,162 (11,431)
Fe Fe ₂ O ₃	8,077 (11,555)
K (K ₂ O)	1,260 (1,518)
Mg (MgO)	6,283 (10,419)
Mn (MnO)	0,131 (0,169)
Na (Na ₂ O)	1,394 (1,879)
P (P ₂ O ₅)	0,462 (1,058)
S (SO ₃)	0,021 (0,052)
Si (SiO ₂)	18,094 (38,662)
Ti (TiO ₂)	1,637 (2,729)
Ba	0,04
Cr	0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,05
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,03
F	0,24
Parámetro	(%)
L.O.I.*	10,20
Balance**	100,00

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7073 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,775 (12,808)
Ca (CaO)	7,124 (9,977)
Fe Fe ₂ O ₃	10,049 (14,376)
K (K ₂ O)	1,277 (1,539)
Mg (MgO)	4,202 (6,969)
Mn (MnO)	0,161 (0,208)
Na (Na ₂ O)	2,161 (2,913)
P (P ₂ O ₅)	0,461 (1,055)
S (SO ₃)	0,015 (0,037)
Si (SiO ₂)	19,662 (42,013)
Ti (TiO ₂)	2,557 (4,261)
Ba	0,06
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,10
Zn	0,01
Zr	0,04
Cl	0,08
F	0,14
Parámetro	(%)
L.O.I.*	3,40
Balance**	99,99

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7074 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,225 (11,767)
Ca (CaO)	7,099 (9,942)
Fe Fe ₂ O ₃	9,650 (13,806)
K (K ₂ O)	1,496 (1,802)
Mg (MgO)	5,201 (8,625)
Mn (MnO)	0,140 (0,181)
Na (Na ₂ O)	1,755 (2,365)
P (P ₂ O ₅)	0,385 (0,881)
S (SO ₃)	0,002 (0,006)
Si (SiO ₂)	19,741 (42,182)
Ti (TiO ₂)	2,435 (4,059)
Ba	0,05
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,09
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,03
F	0,15
Parámetro	(%)
L.O.I.*	4,00
Balance**	100,00

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7075 Análisis: 26-jun-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	7,455 (14,092)
Ca (CaO)	7,570 (10,602)
Fe Fe ₂ O ₃	10,728 (15,347)
K (K ₂ O)	0,648 (0,781)
Mg (MgO)	5,039 (8,356)
Mn (MnO)	0,158 (0,204)
Na (Na ₂ O)	1,791 (2,414)
P (P ₂ O ₅)	0,394 (0,901)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	19,177 (40,977)
Ti (TiO ₂)	2,561 (4,268)
Ba	0,06
Cr	< 0,01
Pb	,0,01
Sr	< 0,01
Zn	0,09
Zr	0,01
Cl	0,03
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	1,90
Balance**	100,04

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7076 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,355 (12,014)
Ca (CaO)	5,419 (7,590)
Fe Fe ₂ O ₃	9,904 (14,169)
K (K ₂ O)	0,660 (0,795)
Mg (MgO)	5,045 (8,367)
Mn (MnO)	0,115 (0,149)
Na (Na ₂ O)	1,352 (1,822)
P (P ₂ O ₅)	0,374 (0,856)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	20,535 (43,878)
Ti (TiO ₂)	2,560 (4,266)
Ba	0,05
Cr	0,03
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,02
F	0,10
Parámetro	(%)
L.O.I.*	5,80
Balance**	100,02

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7077-A Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,489 (12,267)
Ca (CaO)	4,710 (6,597)
Fe Fe ₂ O ₃	10,092 (14,438)
K (K ₂ O)	0,718 (0,865)
Mg (MgO)	4,874 (8,083)
Mn (MnO)	0,119 (0,154)
Na (Na ₂ O)	1,293 (1,742)
P (P ₂ O ₅)	0,230 (0,527)
S (SO ₃)	0,004 (0,011)
Si (SiO ₂)	20,659 (44,143)
Ti (TiO ₂)	2,525 (4,209)
Ba	0,05
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,03
F	0,06
Parámetro	(%)
L.O.I.*	6,70
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7078 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	6,703 (12,672)
Ca (CaO)	6,770 (9,482)
Fe Fe ₂ O ₃	10,090 (14,435)
K (K ₂ O)	1,070 (1,289)
Mg (MgO)	5,303 (8,795)
Mn (MnO)	0,157 (0,202)
Na (Na ₂ O)	2,704 (3,644)
P (P ₂ O ₅)	0,415 (0,950)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	20,451 (43,699)
Ti (TiO ₂)	2,524 (4,207)
Ba	0,06
Cr	0,02
Pb	< 0,01
Sr	0,09
Zn	0,01
Zr	0,04
Cl	0,04
F	0,07
Parámetro	(%)
L.O.I.*	0,30
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7079 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	4,659 (8,808)
Ca (CaO)	6,572 (9,205)
Fe Fe ₂ O ₃	9,852 (14,094)
K (K ₂ O)	0,164 (0,197)
Mg (MgO)	8,600 (14,262)
Mn (MnO)	0,119 (0,153)
Na (Na ₂ O)	0,590 (0,795)
P (P ₂ O ₅)	0,049 (0,112)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	20,178 (43,115)
Ti (TiO ₂)	1,493 (2,488)
Ba	0,03
Cr	0,16
Pb	< 0,01
Sr	0,02
Zn	0,01
Zr	0,01
Cl	< 0,01
F	0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	6,50
Balance**	100,01

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-7080 Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	7,914 (14,961)
Ca (CaO)	5,019 (7,030)
Fe Fe ₂ O ₃	9,114 (13,039)
K (K ₂ O)	1,147 (1,382)
Mg (MgO)	3,035 (5,033)
Mn (MnO)	0,138 (0,178)
Na (Na ₂ O)	1,963 (2,645)
P (P ₂ O ₅)	0,312 (0,714)
S (SO ₃)	0,001 (0,003)
Si (SiO ₂)	21,749 (46,472)
Ti (TiO ₂)	1,830 (3,050)
Ba	0,05
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,07
Zn	0,01
Zr	0,03
Cl	0,04
F	0,08
Parámetro	(%)
L.O.I.*	5,20
Balance**	99,99

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

Trabajo: T-7465 Muestra: M-Cenizas Análisis: 15-oct-12	
Elemento (Óxido)	Contenido (%)
Al (Al ₂ O ₃)	9,390 (17,750)
Ca (CaO)	5,900 (8,264)
Fe Fe ₂ O ₃	7,807 (11,169)
K (K ₂ O)	1,115 (1,343)
Mg (MgO)	1,971 (3,269)
Mn (MnO)	0,192 (0,248)
Na (Na ₂ O)	2,614 (3,523)
P (P ₂ O ₅)	0,466 (1,067)
S (SO ₃)	< 0,001 (< 0,002)
Si (SiO ₂)	21,943 (46,886)
Ti (TiO ₂)	1,774 (2,956)
Ba	0,08
Cr	< 0,01
Pb	< 0,01
Sr	0,14
Zn	0,01
Zr	0,04
Cl	0,04
F	< 0,05
Parámetro	(%)
L.O.I.*	3,20
Balance**	100,02

* L.O.I.: Pérdida de peso por ignición según Norma UNE-EN 196-2, generalmente debida a la pérdida de humedad, agua de cristalización, CO₂ de carbonatos y de
 ** Sumatoria de la L.O.I., óxidos mayoritarios, Ba, Cr, Pb, Sr, Zn, Zr, Cl y F contenidos en muestra

A-1.6.5 DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN MUESTRA DE POLVO MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X

A-1.6.5.1 La Difracción de Rayos-X. Descripción del método

A-1.6.5.1.1 Fundamento teórico

Los rayos-X son una forma de radiación electromagnética de elevada energía y pequeña longitud de onda; del orden de los espacios interatómicos de los sólidos.

Cuando un haz de rayos-X incide sobre un material, se producen diferentes tipos de interacciones con la materia:

Fenómenos espectroscópicos, en los que los rayos-x interaccionan con los átomos que componen el material. Del estudio de estos fenómenos se obtiene información sobre la composición química del material: Fluorescencia, Absorción o Emisión.

Fenómenos ópticos que no conllevan ningún tipo de interacción con los átomos de la materia. Reflexión, Refracción y Difracción.

La difracción es un fenómeno de interferencia constructiva de ondas de rayos X coherentes emitidas por átomos dispuestos periódicamente. Esto significa que solo difractarán las fases que presentan estructura periódica y orden cristalino (fases cristalinas). Las fases amorfas, como el vidrio, no difractan. Por otro lado, para que haya difracción, la longitud de onda de la radiación debe ser del orden de magnitud de las distancias interatómicas. El fenómeno de la difracción se produce solo en determinados ángulos de incidencia, aquellos que cumplen la Ley de Bragg.

En un cristal (disposición periódica de átomos) los fotones del haz de rayos-X interaccionan dispersándose. Estos fotones dispersados interfieren entre sí: esta interferencia será destructiva en todas las direcciones excepto en aquellas que cumplan la Ley de Bragg. Solamente en aquellos casos en que exista interferencia totalmente constructiva de las ondas dispersadas, se produce difracción de rayos-X. Para que se produzca esta interacción constructiva de dos (o más) haces reflejados se deben cumplir dos condiciones: que tengan el mismo recorrido y que su recorrido difiera en un múltiplo entero de su longitud de onda (Fig. Anejo 1.7).

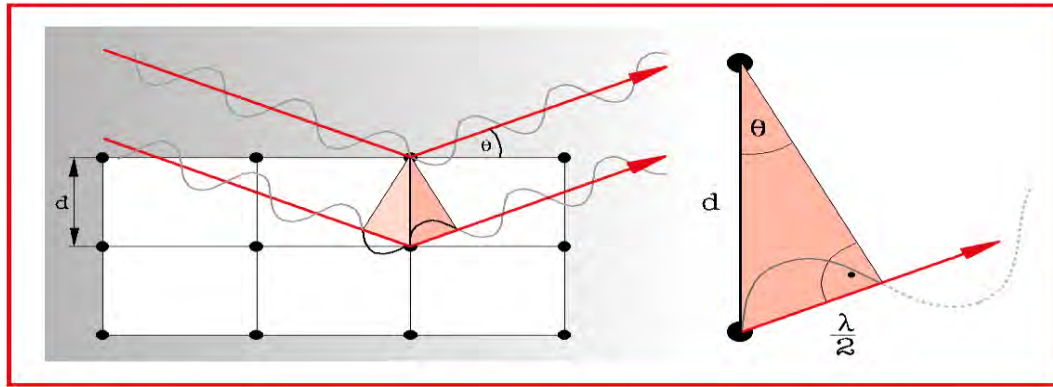


Fig. Anejo 1.7: Condiciones geométricas de la Ley de Bragg

Un grupo de planos paralelos con una distancia interplanar d , produce un rayo difractado solo si se cumple la Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Donde:

λ es la longitud de onda del haz incidente

θ es el ángulo de incidencia

d es el espaciado interplanar

Por lo tanto, en los casos en que se cumpla la Ley de Bragg, la interferencia entre haces dispersados por planos paralelos será totalmente constructiva porque los haces dispersados estarán en fase. Para otros ángulos, las ondas resultantes de las reflexiones desde distintos planos sucesivos estarán desfasados y su suma será destructiva.

Cabe destacar que en cada fase cristalina, hay muchos juegos de planos con diferentes orientaciones y distancias interplanares, por lo que difractará en unos valores muy concretos y característicos de ángulo de incidencia θ , proporcionales según la ley de Bragg a los espacios interplanares de los planos atómicos que los componen (Fig. Anejo 1.8).

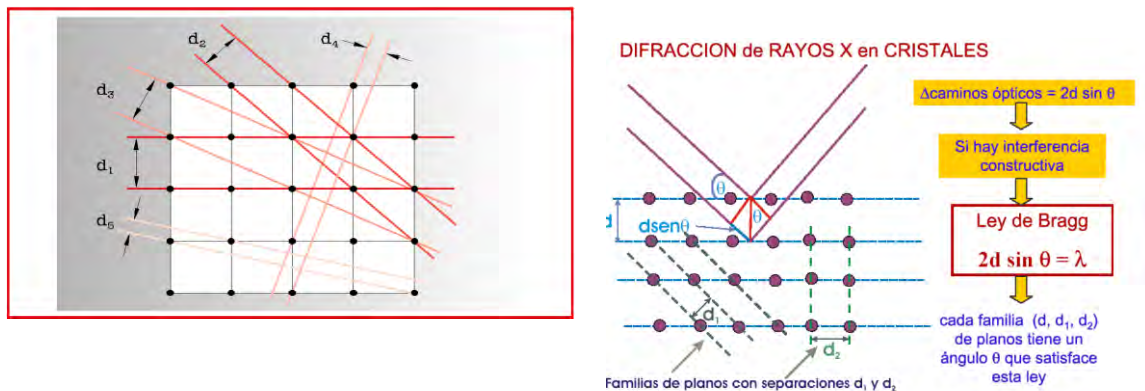


Fig. Anejo 1.8: Difracción de Rayos-X en un cristal

La difracción de rayos-X consiste en hacer incidir un haz de rayos-x sobre un material y medir la dirección, intensidad y fase de las radiaciones difractadas por las fases cristalinas que componen dicho material. Por lo tanto, esta técnica no da información sobre la composición química, sino de la geometría cristalina de las distintas fases. En los materiales con los que se trabaja en el CEDEX, las fases cristalinas se refieren a los minerales naturales componentes de suelos y rocas, las fases constituyentes de todo tipo de aleaciones, así como los cristales formados durante el fraguado de cementos y hormigones.

A-1.6.5.2 Equipamiento

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX cuenta con un difractómetro de rayos-X de PANalytical modelo X'Pert PRO, que al estar homologado no es considerado instalación radiactiva (Fig. Anejo 1.9).

Este equipo tiene la capacidad de determinación de estructuras cristalinas en materiales, incluyendo el tratamiento de la señal y el procesamiento de datos mediante software específico. Trabaja con un generador de rayos-X, de tensión regulable hasta 60 KV y corriente regulable hasta 60 mA, un tubo cerámico con ánodo de cobre y un goniómetro de geometría theta/theta, permitiendo la instalación de diferentes plataformas portamuestras.



Fig. Anejo 1.9: Difractómetro de Rayos-X

Presenta una óptica de haz incidente con rendijas fijas de divergencia y rendija Soller, óptica de haz difractado para geometría Bragg-Brentano en disposición Theta-Theta, con rendijas de haz difractado de alta precisión, filtro de níquel, monocromador secundario y un detector ultrarrápido de estado sólido.

La instalación cuenta además con una cámara de alta temperatura con dispositivo de control de temperatura mediante software, capaz de proporcionar una temperatura controlada, tanto constante como variable en función del tiempo, comprendida entre la temperatura ambiente y 1200°C, así como una cámara de humedad controlada con dispositivo de control de humedad mediante software, capaz de alcanzar una humedad relativa de 95% dentro del rango de temperatura comprendido entre la temperatura ambiente y 50°C°.

De esta forma es posible analizar las variaciones de las fases cristalinas que componen las muestras en función de la humedad y/o la temperatura, tales como expansiones y contracciones de la celda unidad, variaciones de la cristalinidad, transformaciones de fase, cristalizaciones y disoluciones, etc.

A-1.6.5.3 Preparación de muestras

Se ha realizado un difractograma de rayos-X de polvo con el fin de obtener la mineralogía global del material estudiado. Para ello las muestras han sido únicamente secadas al aire, machacadas y tamizadas por el tamiz UNE 0,080 mm.

A-1.6.5.4 Análisis Experimental

A-1.6.5.4.1 Parámetros de análisis

Los análisis se han llevado a cabo en un difractómetro de rayos-X Panalytical, modelo XPERT-PRO en disposición Theta-Theta, con una plataforma multipropósito. Los rayos-X se generaron a partir de un ánodo de Cu bajo unas condiciones de corriente de 40 mA y 45 kV. Se realizó un barrido continuo en el intervalo comprendido entre 3 y 70 °2θ, con un tamaño de paso de 0.02 y un tiempo de paso de 30 segundos. En la óptica primaria se instalaron una rendija Soller de 0,04 radianes, una rendija de divergencia de haz incidente fija de 1/8 y una rendija anti-dispersión de 1/4. En la óptica secundaria se instalaron una rendija anti-dispersión de 3,4 y un filtro de Níquel.

A-1.6.5.4.2 Identificación de fases cristalinas

Los difractogramas resultantes fueron estudiados mediante el software de análisis HIGHSCORE PLUS.

La identificación de las fases minerales se realiza mediante el uso de una base de datos de validez mundial y en continua actualización (PDF: Powder Diffraction File) que contiene todos los compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales conocidos hasta el momento, y gestionada por la Joint Committee on Powder Diffraction Standards.

No ha sido posible cuantificar ninguna de las muestras analizadas debido a la presencia de vidrio amorfo, que imposibilita la estimación cuantitativa. Se describe, por lo tanto, cualitativamente la mayor o menor abundancia relativa de cada una de las fases identificadas.

Para describir cualitativamente la abundancia de vidrio volcánico, se diferencia entre:

- Roca cristalina (0%)
- Presencia de vidrio volcánico (0-20%)
- Roca rica en vidrio volcánico (20-50%)
- Roca vítrea (50-80%)

A-1.6.5.5 Resultados

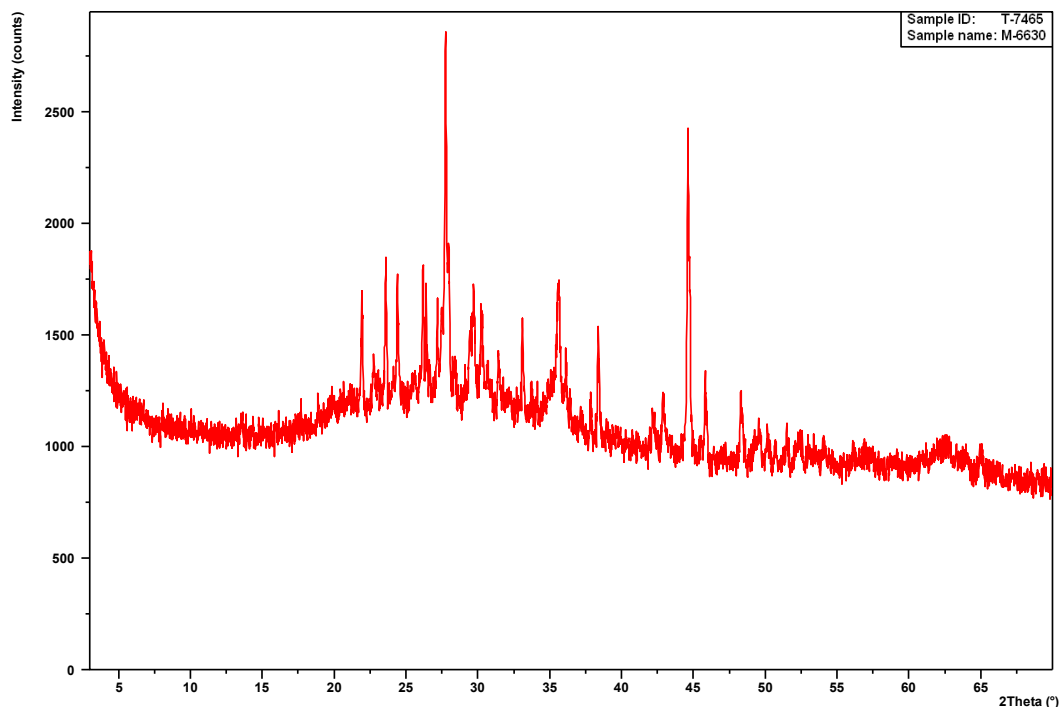
A-1.6.5.5.1 M- 5141 (Cenizas)

DIFRACTOGRAMA

La muestra, de composición básica. Presenta abundancia de feldespatos de la familia de las plagioclasas (anortita y albita), junto con óxido de hierro (magnetita), clinopiroxenos de Ca, Mg y Fe (augita, diópsido) y una menor presencia de olivino, tanto férrico (fayalita) como magnésico (forsterita). Se detecta la presencia de vidrio volcánico amorfo (0-20%).

***	Feldespatos: Plagioclasas	Anortita	CaAl₂Si₂O₈
		Albita	NaAlSi₃O₈
**	Óxidos de hierro	Magnetita	Fe ₃ O ₄
**	Clinopiroxenos	Augita	(Ca,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₂ O ₆
		Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆
*	Olivinos	Forsterita	Mg ₂ SiO ₄
		Fayalita	Fe ₂ SiO ₄
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

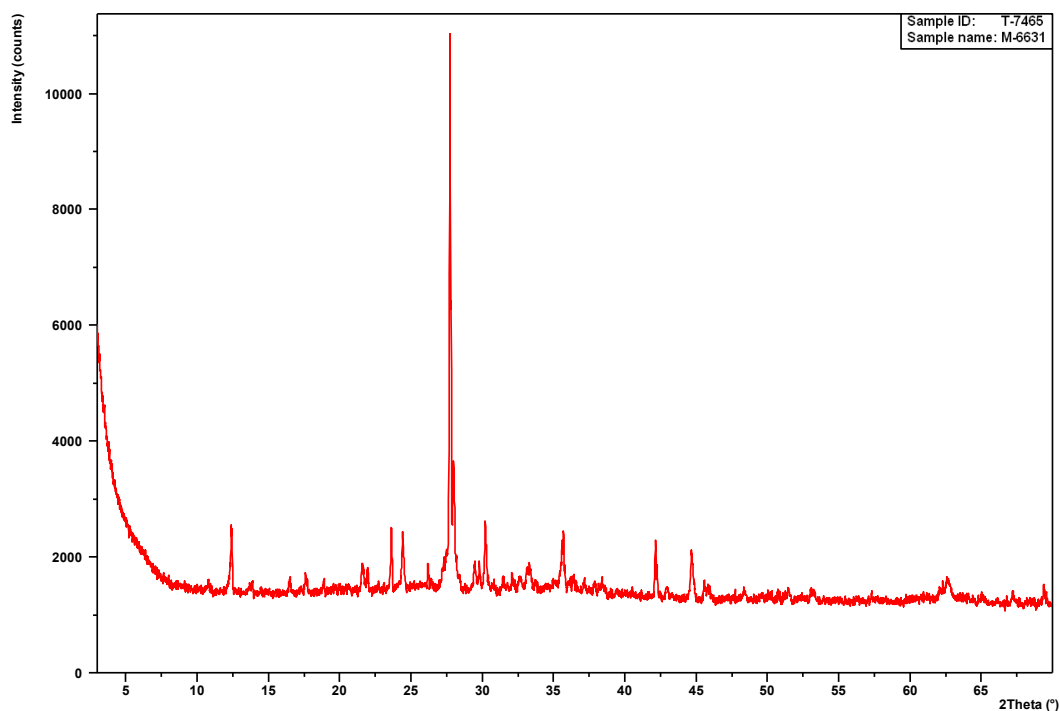
A-1.6.5.5.2 M-6630



Roca de composición ultrabásica, rica en vidrio volcánico (20-50%). El fondo del difractograma muestra una intensidad muy elevada como consecuencia de una elevada concentración de hierro (Fe) en la muestra. Se identifican únicamente feldespatos de la familia de las plagioclasas, fundamentalmente cálcicas (anortita), acompañadas de clinopiroxenos (hedembergita y titano-augita: augita con presencia de titanio en su estructura) e indicios de feldespatoides (nefelina y leucita) y óxido de hierro (hematites).

***	Feldespatos: Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
**	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
		Hedembergita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$
*	Feldespatoides	Nefelina	$(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$
		Leucita	KAlSi_2O_6
*	Óxidos de hierro	Hematites	Fe_2O_3
Rica en vidrio volcánico (20-50%)			

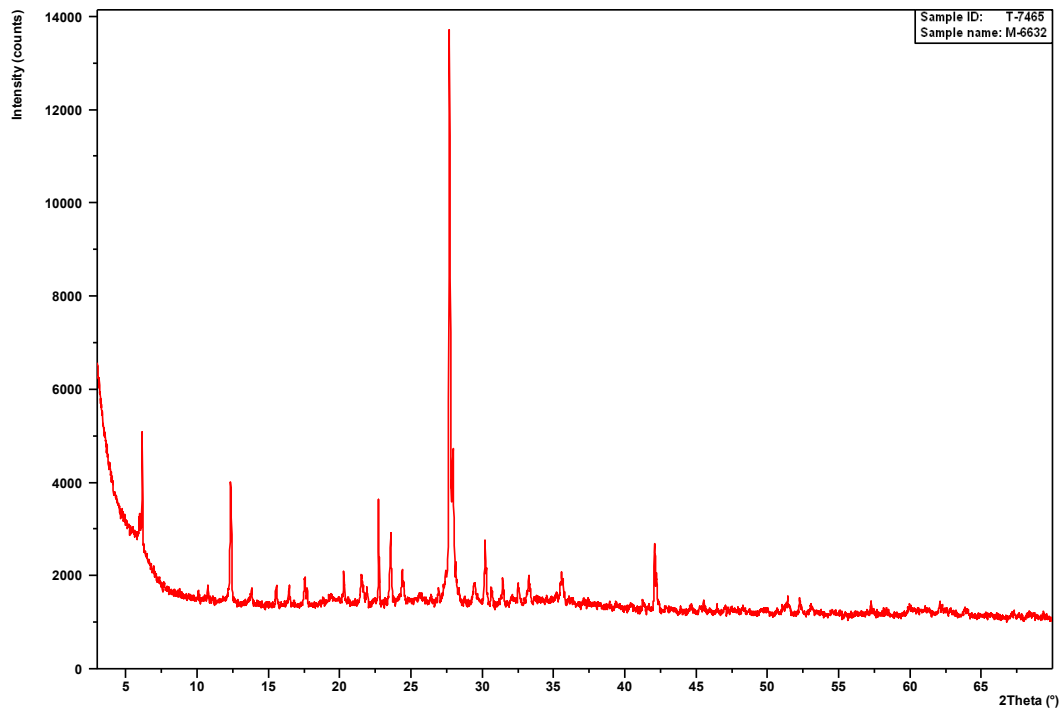
A-1.6.5.5.3 M-6631



Roca cristalina de composición ultrabásica, presenta principalmente una gran abundancia de zeolitas (phillipsita) y plagioclasas cálcicas (anortita), acompañados de clinopiroxenos (augita) y óxido de hierro. Se detecta también indicios de carbonato cálcico (aragonito).

***	Zeolitas	Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8O_{16}.6H_2O$
	Feldespatos: Plagioclasas	Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$
**	Clinopiroxenos	Augita	$(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$
	Óxidos de hierro	Hematites	Fe_2O_3
*	Carbonato cálcico	Aragonito	$CaCO_3$
Roca cristalina (0%)			

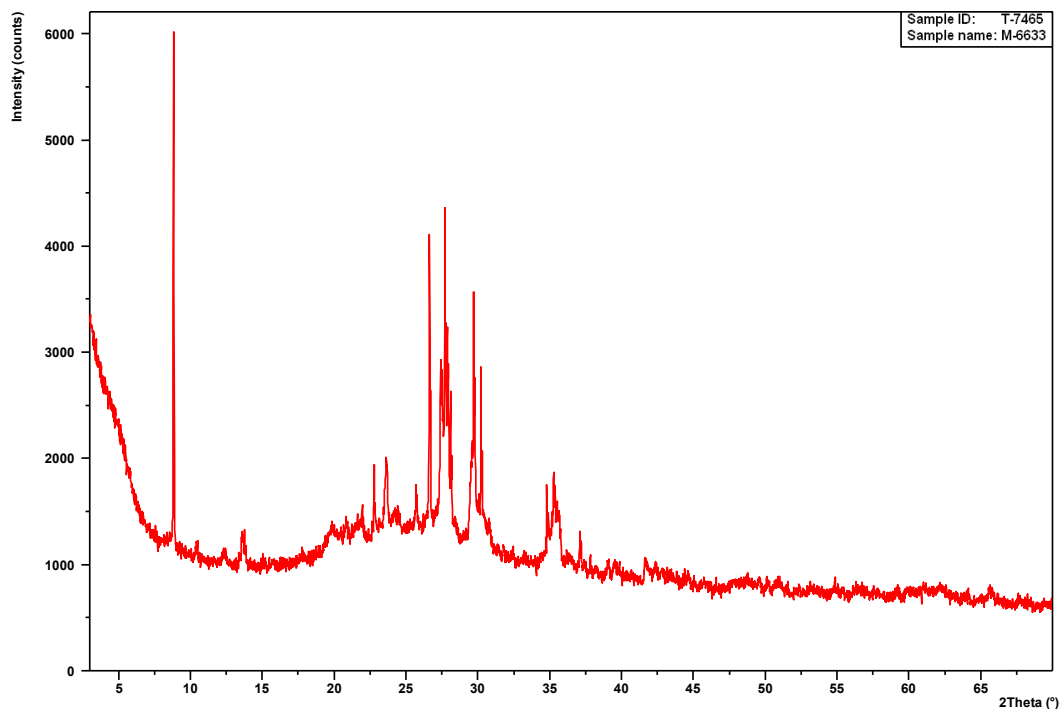
A-1.6.5.5.4 M-6632



Roca cristalina de composición ultrabásica, donde se identifica una gran abundancia de plagioclasas sódicas (albita), acompañadas de zeolitas (phillipsita y otras).

***	Feldespatos: Plagioclasas	Albita	$\text{NaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
**	Zeolitas	Phillipsita Otras	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_{1-2}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Roca cristalina (0%)			

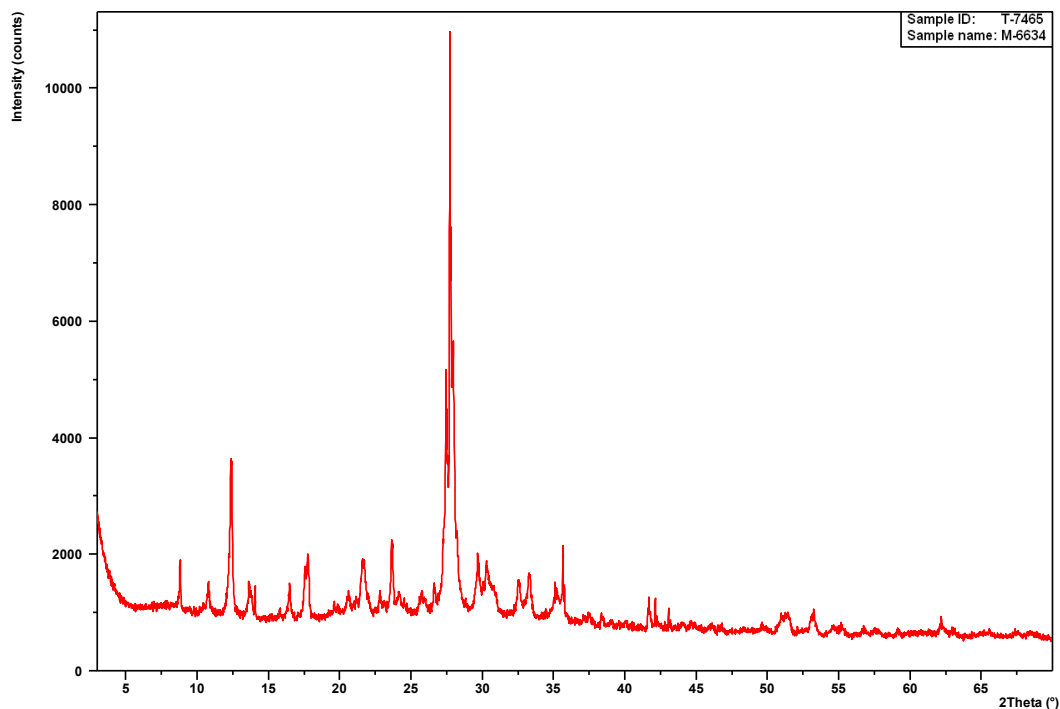
A-1.6.5.5.5 M-6633



Roca de composición básica, rica en vidrio. Presenta abundantes clinopiroxenos (augita, diópsido y hedembergita) y plagioclasas cálcicas (anortita), acompañados de feldespatoides (leucita y nefelina), filosilicatos producto de alteración de la roca (micas y esmectitas) e indicios de óxido de hierro (hematites).

***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
		Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
		Hedembergita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$
***	Feldespatos: Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
**	Feldespatoides	Leucita	KAlSi_2O_6
		Nefelina	$(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$
**	Filosilicatos	Esmectitas	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
		Micas	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
*	Óxido de hierro	Hematites	Fe_2O_3
Rica en vidrio (20-50%)			

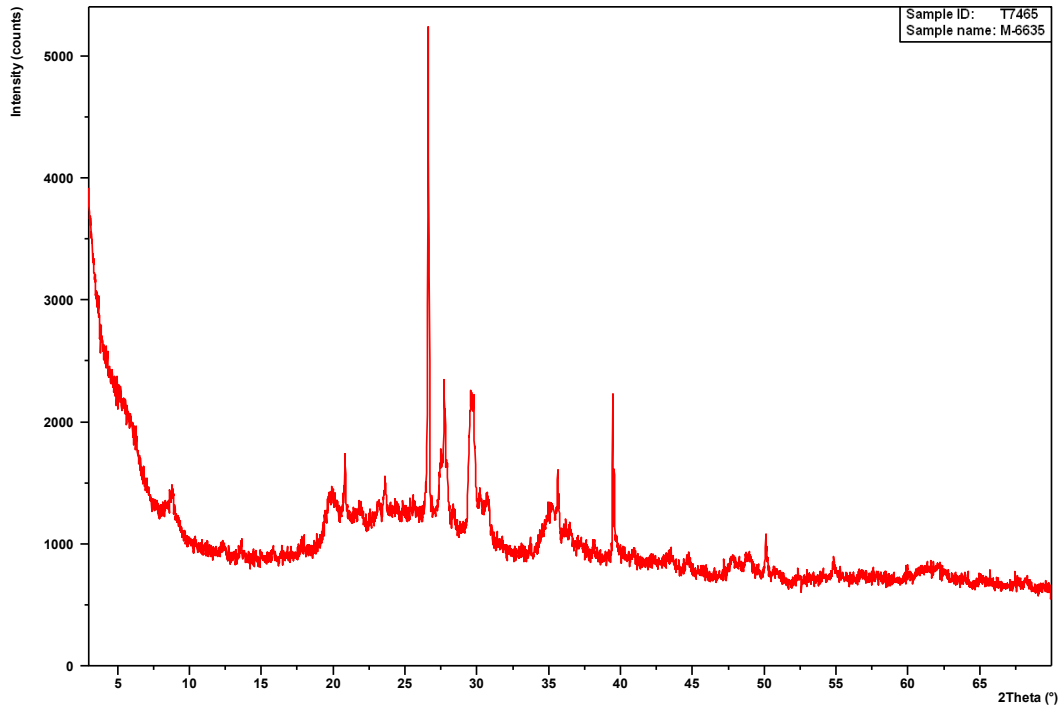
A-1.6.5.5.6 M-6634



Roca de composición básica, con presencia de vidrio (0-20%). Se identifican abundantes feldespatos alcalinos (sanidina y anortoclasa), acompañados de zeolitas (phillipsita) e indicios de clinopiroxenos (clinoenstatita).

***	Feldespatos alcalinos	Sanidina	KAlSi_3O_8
		Anortoclasa	$(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
**	Zeolitas	Phillipsita	$(\text{K,Na,Ca})_{1-2}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
*	Clinopiroxenos	Clinoenstatita	MgSiO_3
Presencia de vidrio (0-20%)			

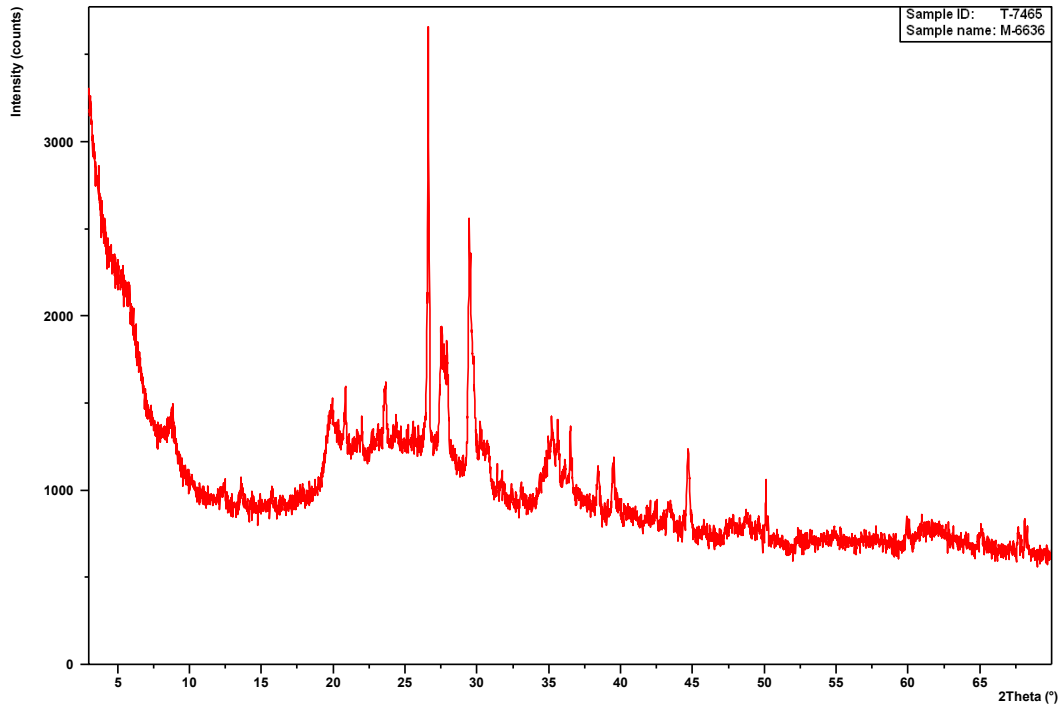
A-1.6.5.5.7 M-6635



Roca de composición básica, rica en vidrio. Se observa una gran abundancia de filosilicatos o minerales de la arcilla, fundamentalmente esmectitas y micas. En menor proporción, se han detectado feldespatos alcalinos (anortoclasa) y clinopiroxenos (augita). Finalmente, se observan indicios de zeolitas (phillipsita) y carbonato cálcico (calcita).

***	Filosilicatos	Esmectitas	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
		Micas	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
**	Feldespatos alcalinos	Anortoclasa	$(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
**	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$
*	Zeolitas	Phillipsita	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})_{1-2}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{16}.6\text{H}_2\text{O}$
*	Carbonato cálcico	Calcita	CaCO_3
Roca rica en vidrio (20-50%)			

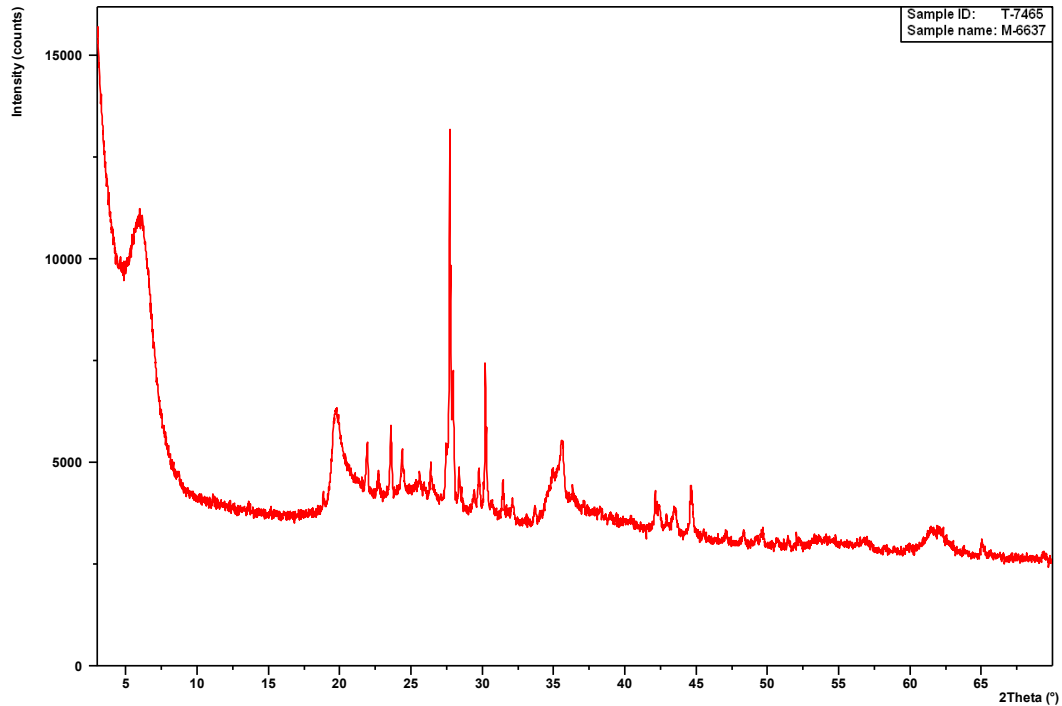
A-1.6.5.5.8 M-6636



Roca de composición básica, rica en vidrio, con abundantes filosilicatos de las familias de las esmectitas y las micas, junto con zeolitas (gismondina). Estos dos grupos minerales son producto de la alteración de la roca. Se han identificado, en menos proporción, feldespatos alcalinos (anortoclasa) y plagioclasas (anortita), e indicios de carbonatos (calcita y ankerita).

***	Filosilicatos	Esmectitas	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
		Micas	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
***	Zeolitas	Gismondina	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}.9\text{H}_2\text{O}$
**	Feldespatos alcalinos	Anortoclasa	$(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
	Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
*	Carbonatos	Calcita	CaCO_3
		Ankerita	$\text{Ca}(\text{Fe, Mg, Mn})(\text{CO}_3)_2$
Roca rica en vidrio (20-50%)			

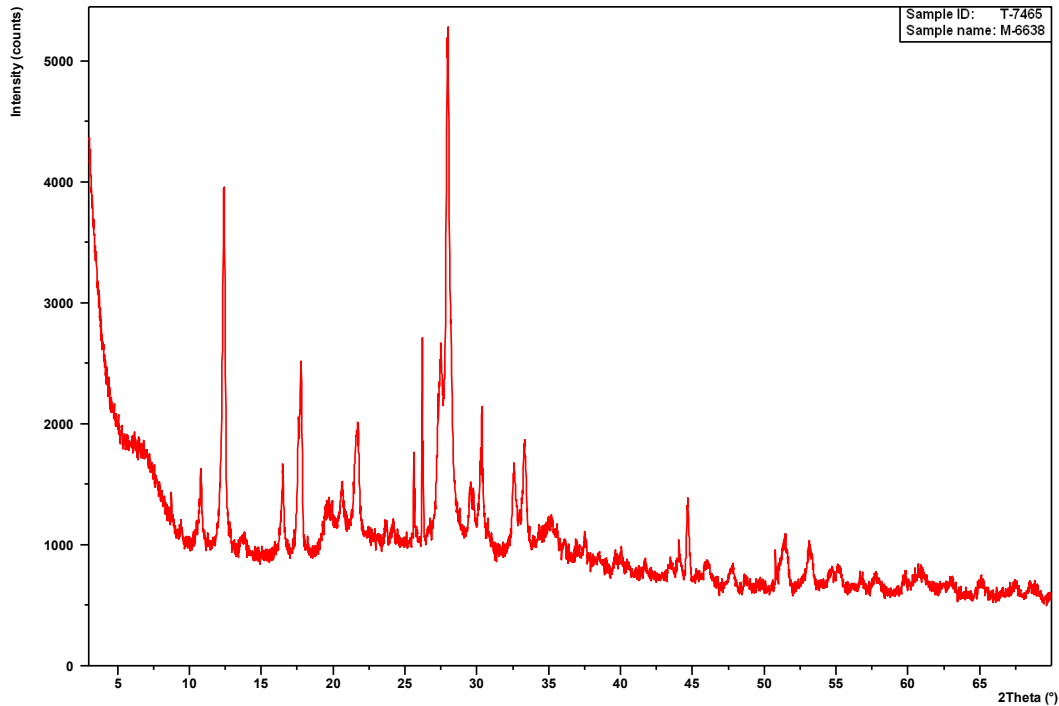
A-1.6.5.5.9 M-6637



Roca de composición ultrabásica, con presencia de vidrio. Se observa gran abundancia de filosilicatos de la familia de las esmectitas, producto de alteración de la roca, acompañadas de plagioclasas (anortita) e indicios de clinopiroxeno (augita).

***	Filosilicatos	Esmectita	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
**	Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
*	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$
Roca rica en vidrio (20-50%)			

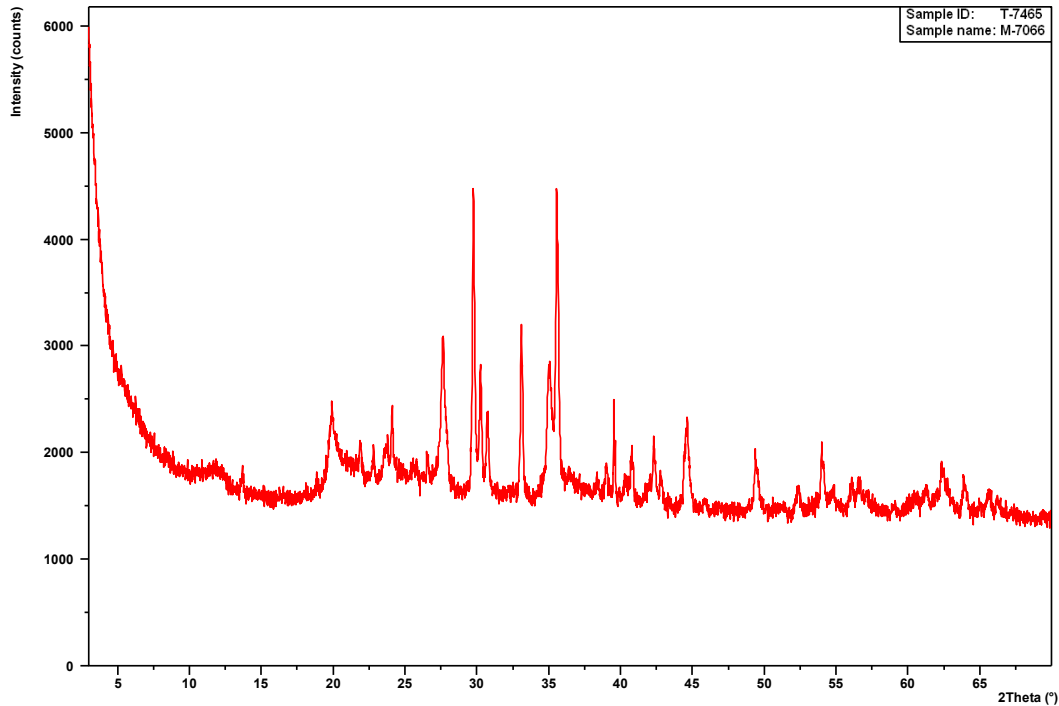
A-1.6.5.5.10 M-6638



Roca de composición básica con presencia de vidrio volcánico. Se observa gran abundancia de zeolitas (phillipsita) y filosilicatos (esmetitas), producto de alteración de la roca, acompañadas de feldespatos alcalinos (sanidina) y clinopiroxenos (augita).

***	Zeolitas	Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8O_{16} \cdot 6H_2O$
***	Filosilicatos	Esmectita	$Na_{0.3}Fe^{3+}_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
**	Feldespatos alcalinos	Sanidina	$KAlSi_3O_8$
*	Clinopiroxenos	Augita	$(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

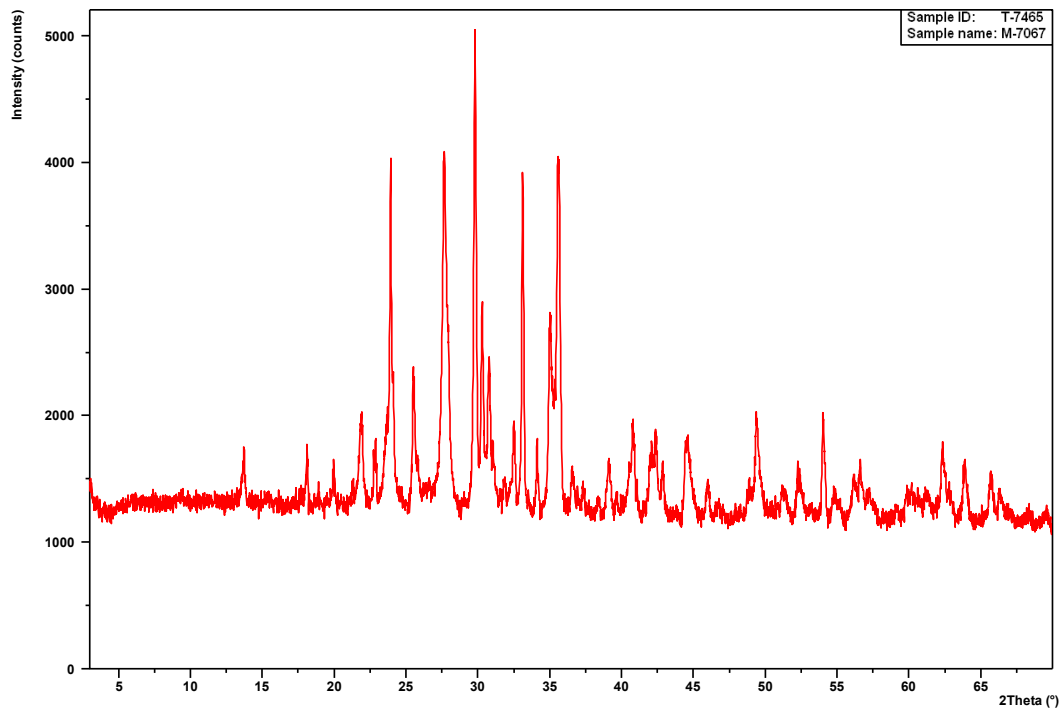
A-1.6.5.5.11 M-7066



Roca de composición ultrabásica compuesta fundamentalmente por clinopiroxenos (augita y diópsido), acompañada de feldespatos alcalinos (anortoclasa y sanidina), óxidos de hierro (hematites) e indicios de Rhonita y Halloisita de Å, ambos producto de alteración de los minerales ferromagnesianos característicos de las rocas máficas como la que se estudia.

***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$
		Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
**	Feldespatos alcalinos	Sanidina	KAlSi_3O_8
		Anortoclasa	$(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
**	Óxidos de hierro	Hematites	Fe_2O_3
*	Otros inosilicatos	Rhonita	$\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Ti})_6(\text{Si},\text{Al})_6\text{O}_{20}$
*	Filosilicatos	Halloisita 7Å	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

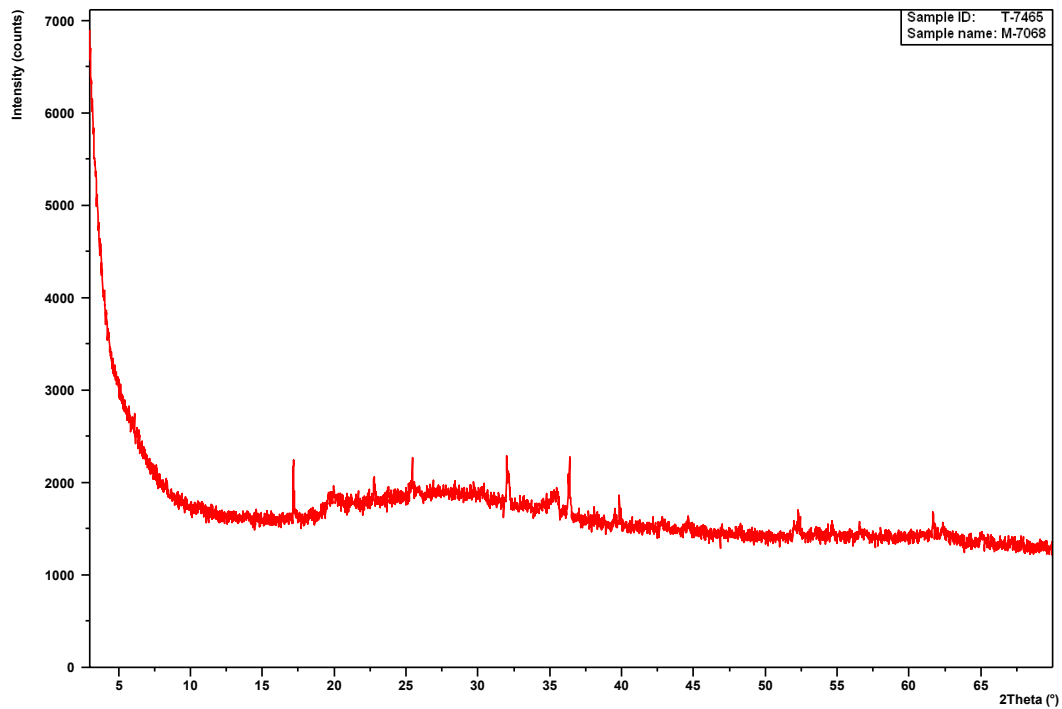
A-1.6.5.5.12 M-7067



Roca cristalina de composición ultrabásica compuesta principalmente por clinopiroxenos (augita) acompañados por óxidos de hierro y titanio (hematites y pseudobrookita), feldespatoideos (sodalita) y plagioclasas.

***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
**	Óxidos de hierro y titanio	Hematites	Fe_2O_3
		Pseudobrookita	Fe_2TiO_5
**	Feldespatoideos	Sodalita	$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$
*	Plagioclasas		
Roca cristalina			

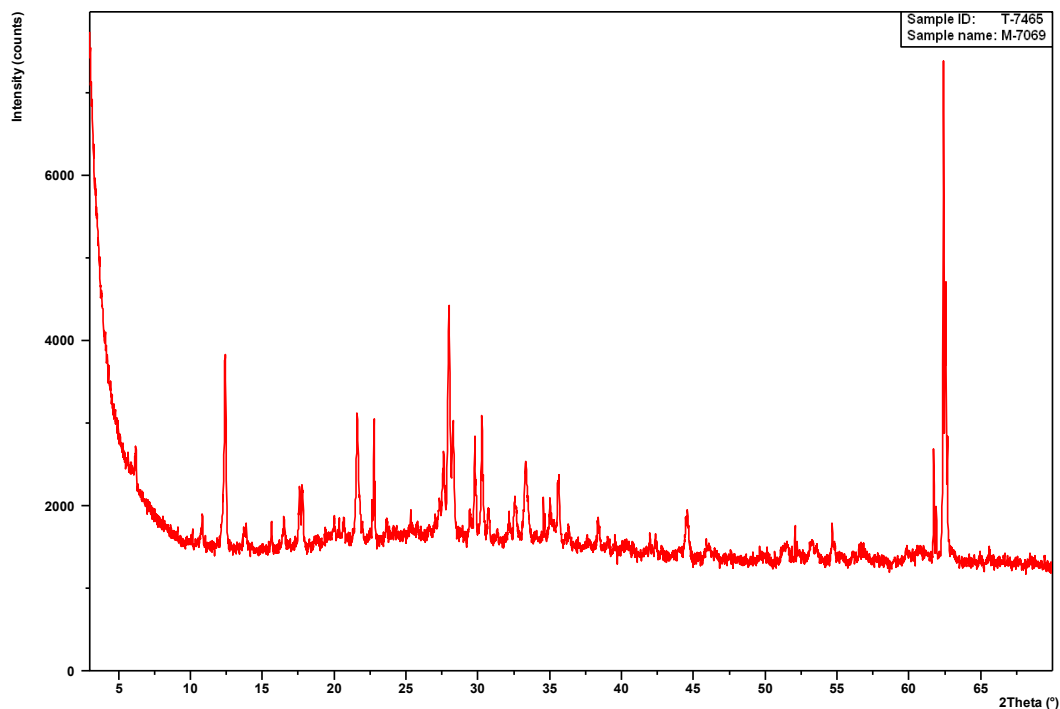
A-1.6.5.5.13 M-7068



Roca vítrea de composición ultrabásica con indicios de olivino magnésico (forsterita).

***	Vidrio volcánico		
**	Olivino	Forsterita	Mg ₂ SiO ₄
Roca vítrea (50-80%)			

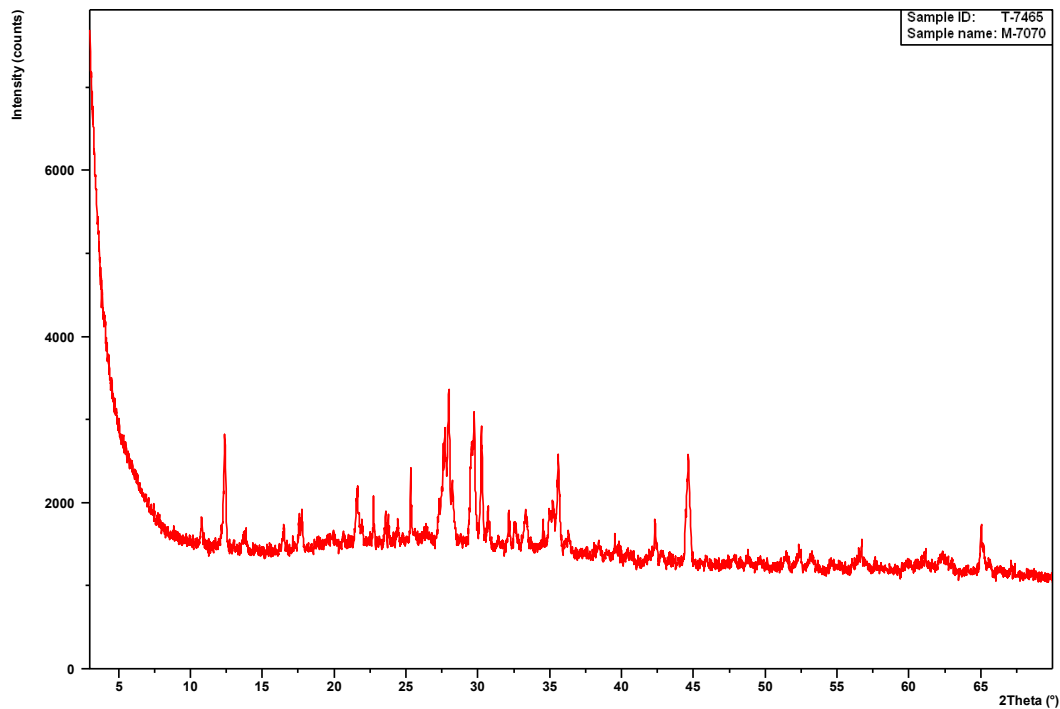
A-1.6.5.5.14 M-7069



Roca de composición ultrabásica con presencia de vidrio volcánico. Compuesta principalmente por diversas zeolitas, de entre las que destaca por su abundancia la phillipsita, acompañada por clinopiroxenos (diópsido) e indicios de olivino (forsterita).

***	Zeolitas	Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8O_{16}.6H_2O$
**	Clinopiroxenos	Diópsido	$CaMgSi_2O_6$
*	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

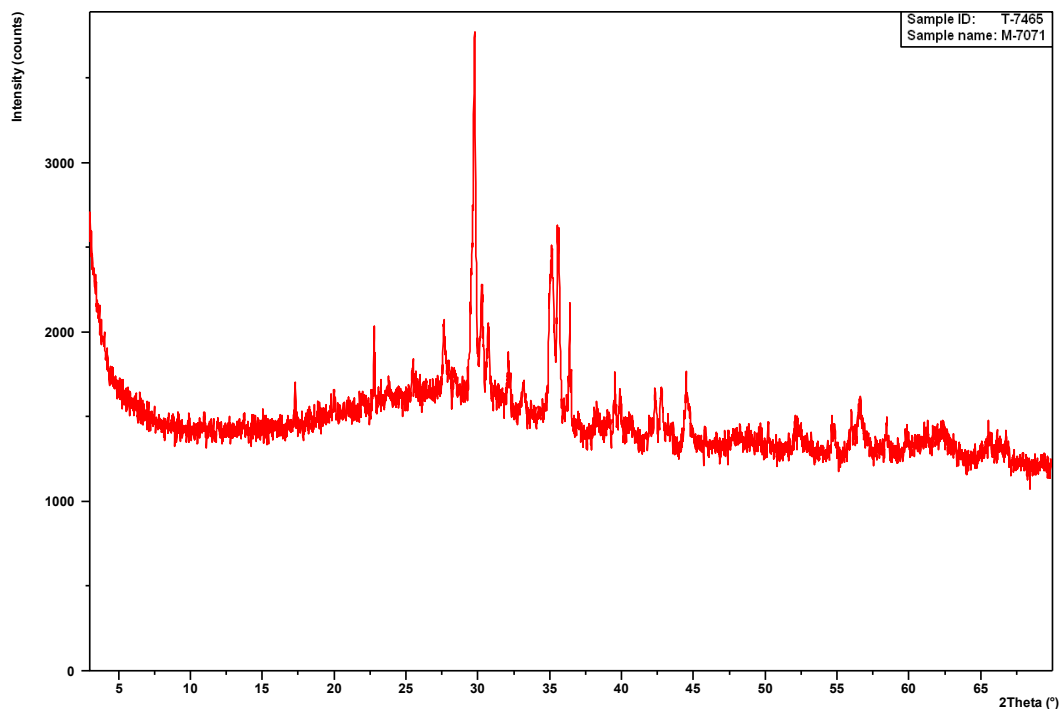
A-1.6.5.5.15 M-7070



Roca de composición ultrabásica con presencia de vidrio volcánico. Presenta fundamentalmente zeolitas (phillipsita), acompañada de plagioclasas (anortita y bitownita), clinopiroxenos (augita) e indicios de olivino (forsterita).

***	Zeolitas	Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8O_{16}.6H_2O$
**	Plagioclasas	Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$
		Bitownita	$(Na, Ca)AlSi_3O_8$
**	Clinopiroxeno	Augita	$(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$
*	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

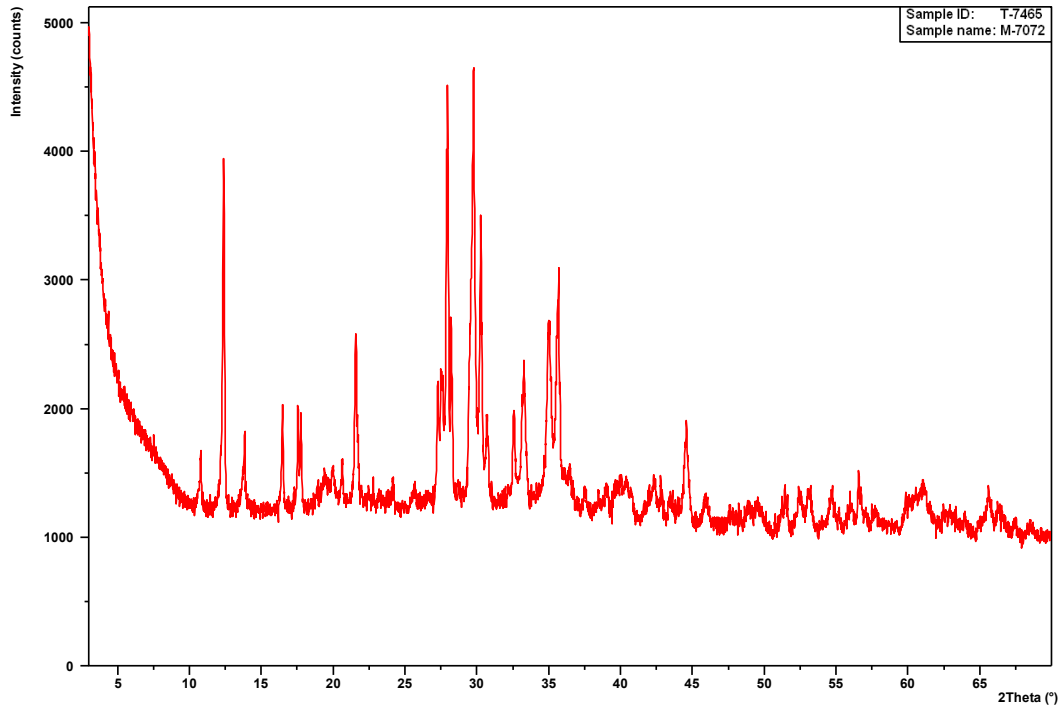
A-1.6.5.5.16 M-7071



Roca vítrea de composición ultrabásica. Dentro de una matriz mayoritariamente vítrea y rica en hierro, se detectan reflexiones de clinopiroxenos (diópsido férrico y augita) y olivino (forsterita), así como indicios de rhonita, un inosilicato producto de la alteración de minerales ferromagnesianos característicos de esta composición.

***	Vidrio volcánico		
**	Clinopiroxeno	Diópsido férrico	$(Ca, Fe)MgSi_2O_6$
		Augita	$(Ca, Mg, Fe)_2(Si, Al)_2O_6$
**	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
*	Otros inosilicatos	Rhonita	$Ca_2(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti)_6(Si, Al)_6O_{20}$
Roca vítrea (50-80%)			

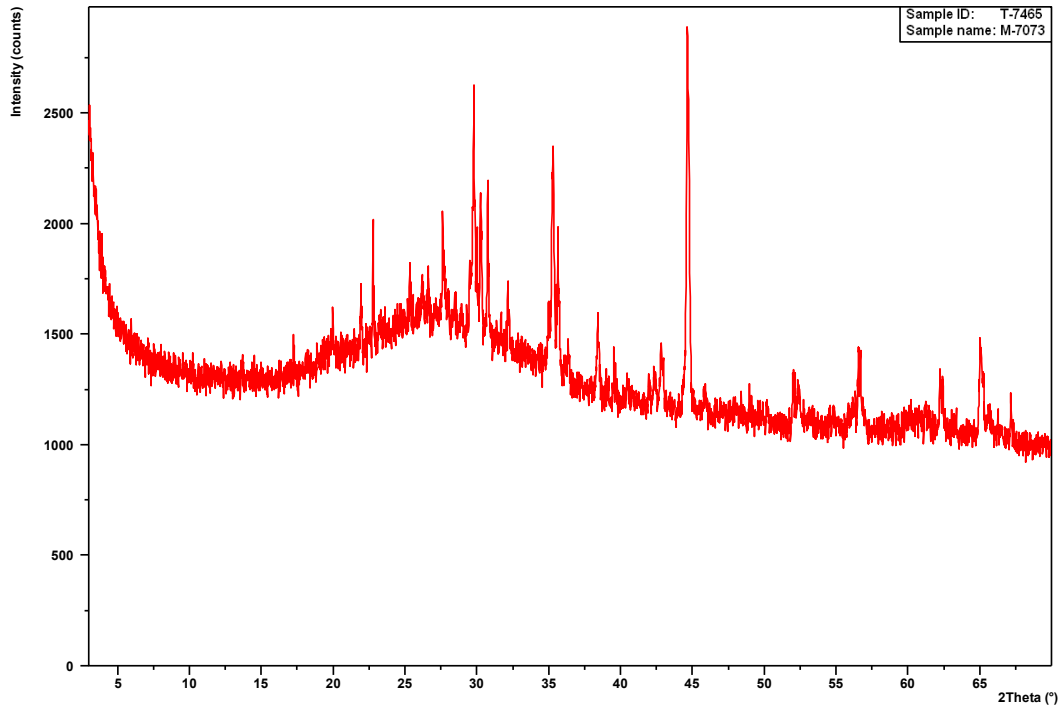
A-1.6.5.5.17 M-7072



Roca de composición básica con presencia de vidrio volcánico. Presenta predominancia de clinopiroxenos (diópsido férrico y augita), acompañados de zeolitas (phillipsita) y minerales del grupo de la zafirina, como la Rhonita, producto de alteración de minerales ferromagnesianos característicos de las rocas máficas.

***	Clinopiroxeno	Diópsido férrico	$(\text{Ca}, \text{Fe})\text{MgSi}_2\text{O}_6$
		Augita	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$
**	Zeolitas	Phillipsita	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_{1-2}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
*	Otros inosilicatos	Rhonita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_6(\text{Si}, \text{Al})_6\text{O}_{20}$
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

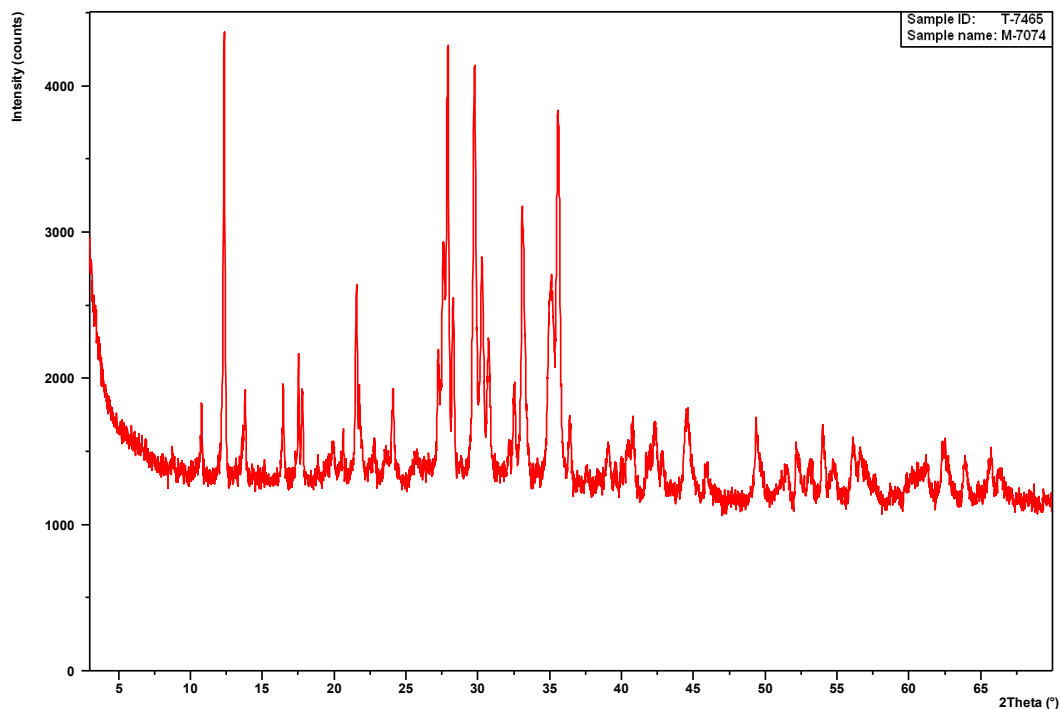
A-1.6.5.5.18 M-7073



Roca vítrea de composición ultrabásica. Dentro de una matriz eminentemente vítrea y rica en hierro, se identifican las reflexiones incipientes de óxidos de hierro (magnetita) y clinopiroxenos (augita y hedembergita), acompañados de olivino (forsterita) y analcima e indicios de esmectitas, producto típico de alteración de las rocas máficas.

***	Vidrio volcánico		
**	Óxido de hierro	Magnetita	Fe_3O_4
**	Clinopiroxeno	Augita	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$
		Hedembergita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$
*	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
*	Analcima	Analcima	$\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$
*	Filosilicatos	Esmectitas (nontronita)	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Roca vítrea (50-80%)			

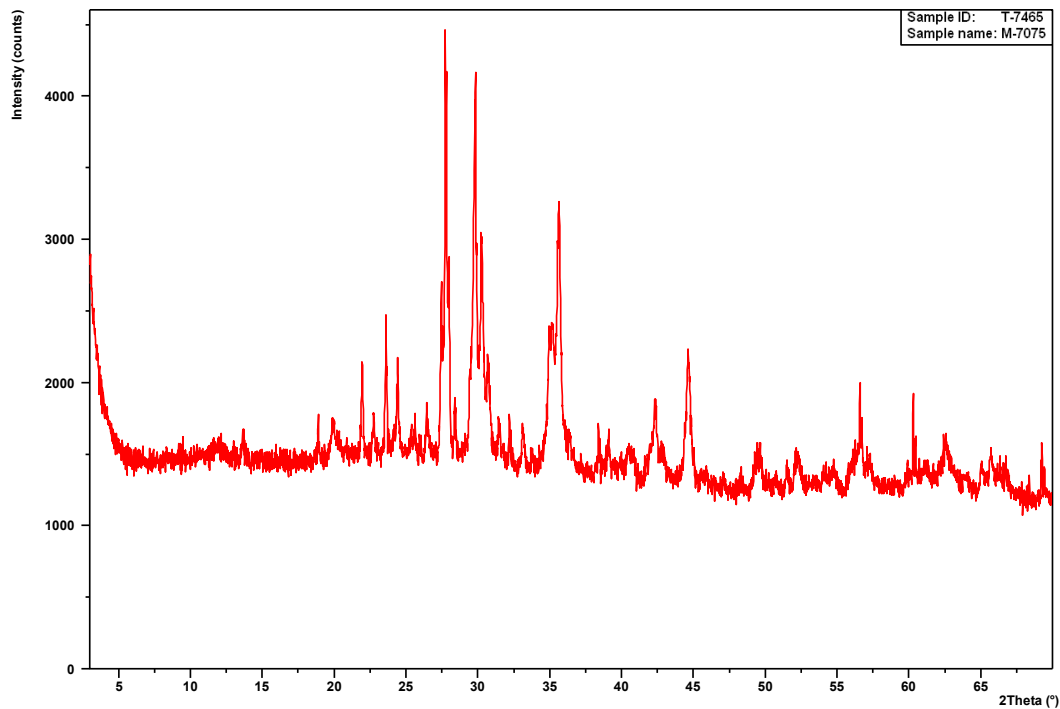
A-1.6.5.5.19 M-7074



Roca cristalina de composición ultrabásica. Compuesta principalmente por zeolitas (phillipsita) y clinopiroxenos (diópsido férrico y augita), acompañados por óxidos de hierro (hematites) y feldespatos alcalinos (anortoclasa).

***	Zeolitas	Phillipsita	$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8O_{16} \cdot 6H_2O$
***	Clinopiroxenos	Diópsido férrico	$(Ca, Fe)MgSi_2O_6$
		Augita	$(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$
**	Óxidos de hierro	Hematites	Fe_2O_3
*	Feldespatos alcalinos	Anortoclasa	$(K,Na)AlSi_3O_8$
Roca cristalina			

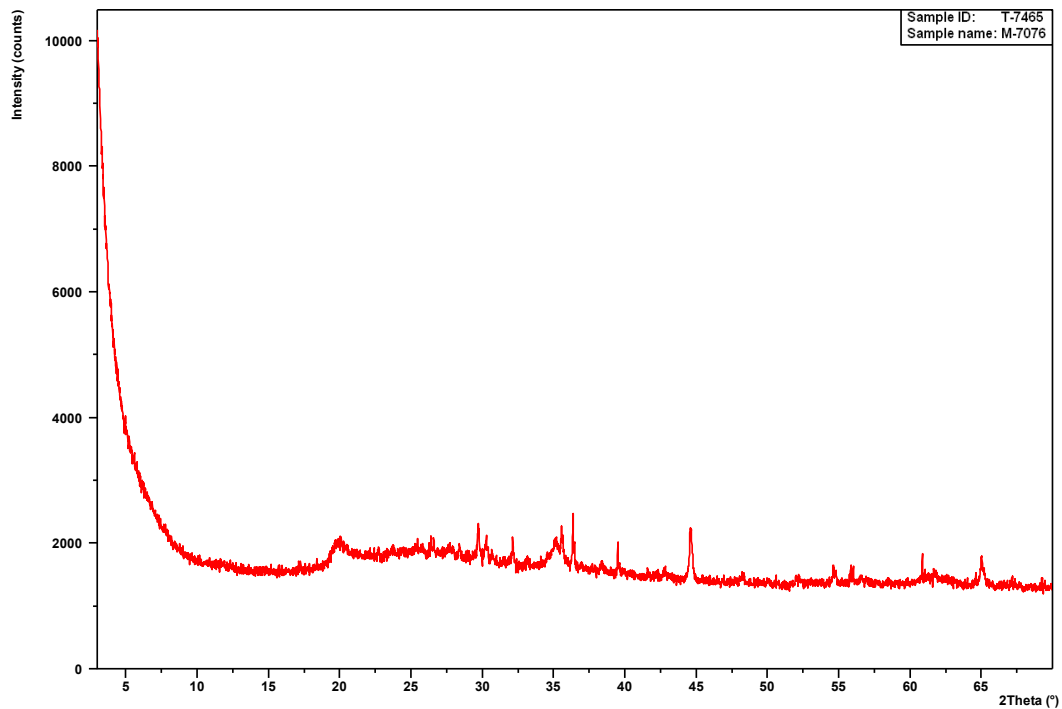
A-1.6.5.5.20 M-7075



Roca cristalina de composición ultrabásica. Presenta como minerales predominantes clinopiroxenos (augita y hedembergita), acompañados de plagioclasas (anortita y albita), e indicios de olivino (forsterita) y óxido de hierro (hematites).

***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$
		Hedembergita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$
**	Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
		Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
*	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
*	Óxido de hierro	Hematites	Fe_2O_3
Roca cristalina			

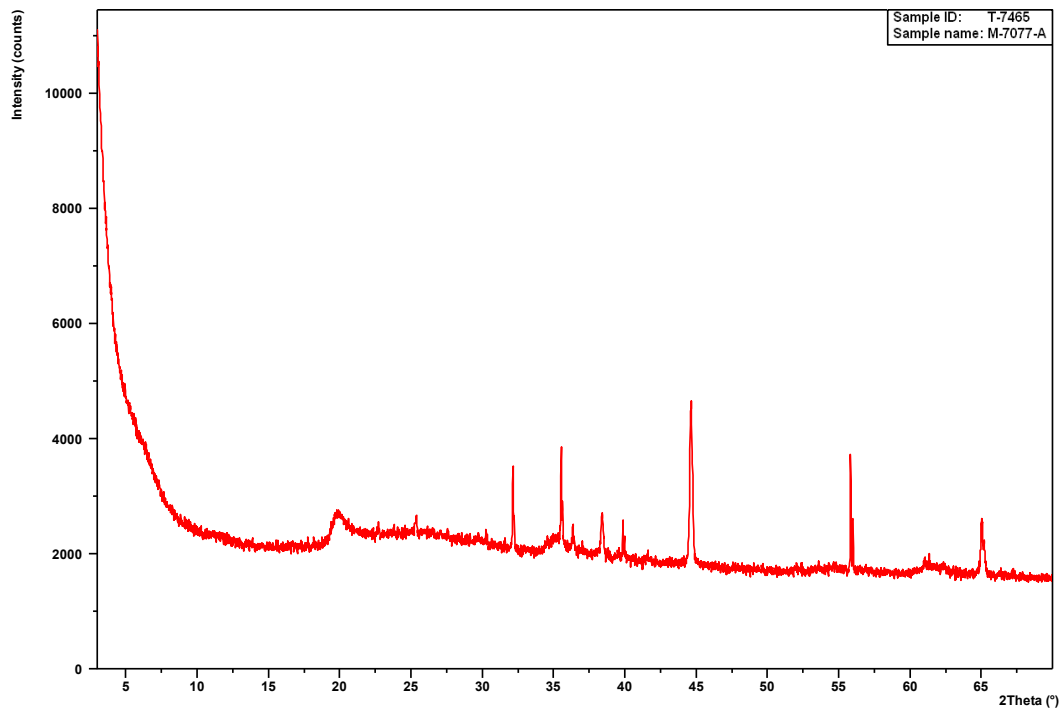
A-1.6.5.5.21 M-7076



Roca vítrea de composición ultrabásica. En el seno de una matriz eminentemente vítrea, se detectan las reflexiones de clinopiroxenos (augita), acompañados de óxidos de hierro y titanio (hematites e ilmenita)

***	Vidrio volcánico		
**	Clinopiroxenos	Augita	(Ca,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₂ O ₆
**	Óxidos de hierro	Hematites	Fe ₂ O ₃
		Ilmenita	FeTiO ₃
Roca vítrea (50-80%)			

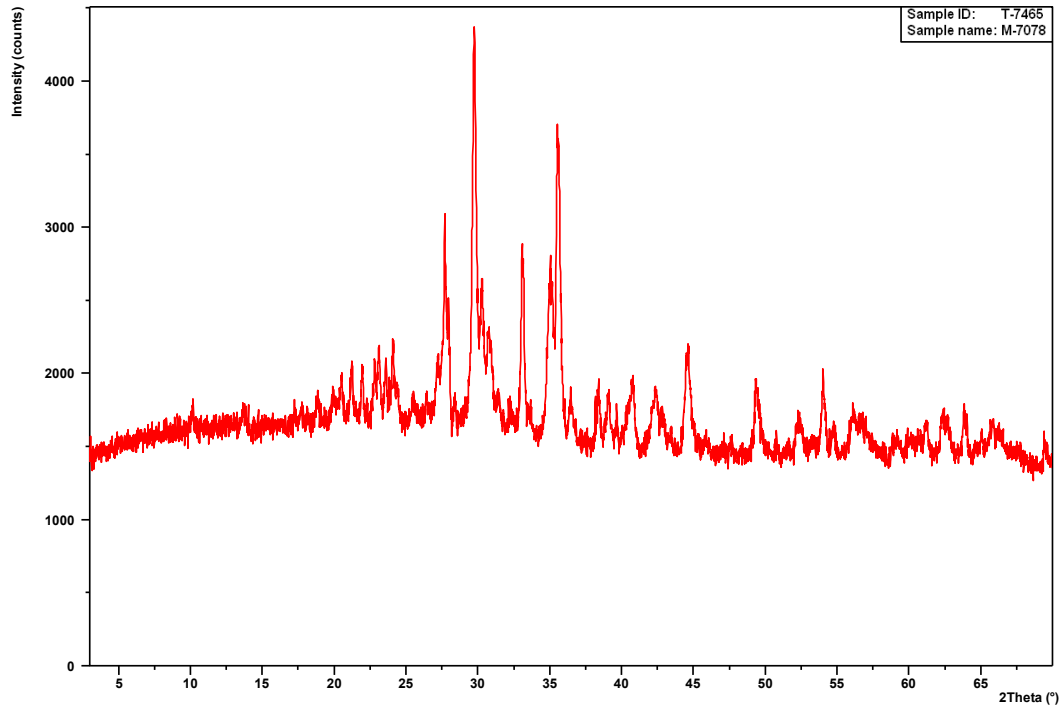
A-1.6.5.5.22 M-7077



Roca vítrea de composición ultrabásica. En el seno de una matriz eminentemente vítrea se detectan las reflexiones de óxidos de hierro y titanio (hematites, ilmenita, magnetita, anatasa y wustita).

***	Vidrio volcánico		
**	Óxidos de hierro y titanio	Hematites	Fe ₂ O ₃
		Magnetita	Fe ₃ O ₄
		Ilmenita	FeTiO ₃
		Anatasa	TiO ₂
		Wustita	FeO
Roca vítrea (50-80%)			

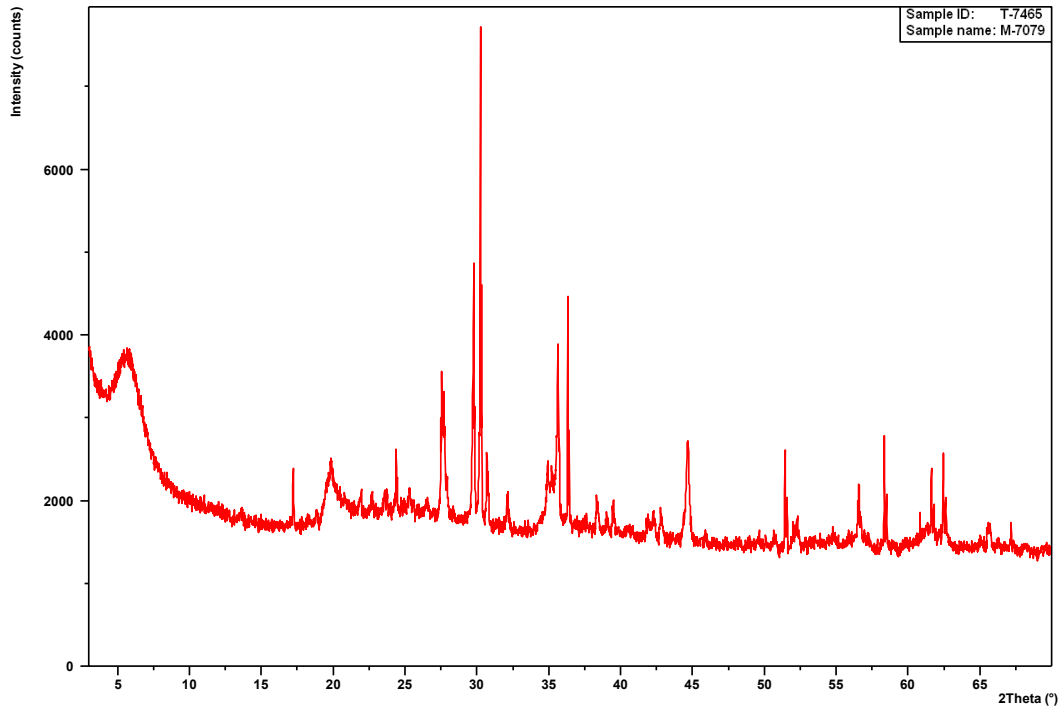
A-1.6.5.5.23 M-7078



Roca de composición ultrabásica rica en vidrio. Compuesta principalmente por óxidos de hierro (hematites) y clinopiroxenos (augita), acompañados de plagioclasas (anortita) y feldespatoideos (nefelina), e indicios de rutilo.

***	Óxidos de hierro	Hematites	Fe_2O_3
***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
**	Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
**	Feldespatoideos	Nefelina	$(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$
*	Óxido de titanio	Rutilo	TiO_2
Roca rica en vidrio (20-50%)			

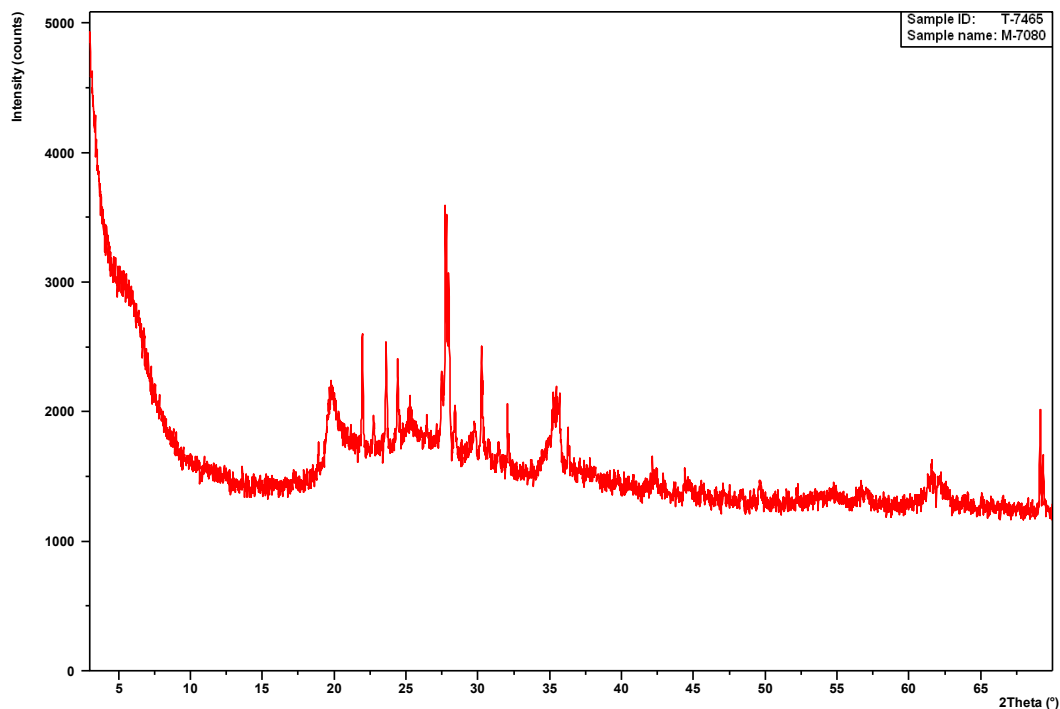
A-1.6.5.5.24 M-7079



Roca de composición ultrabásica con presencia de vidrio volcánico. Predominancia de clinopiroxenos (augita) y filosilicatos (esmectitas), acompañados de óxidos de hierro y titanio (wustita, magnetita e ilmenita), e indicios de analcima y olivinos (forsterita).

***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
***	Filosilicatos	Esmectita (nontronita)	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
**	Óxidos de hierro y titanio	Wustita Magnetita Ilmenita	FeO Fe_3O_4 FeTiO_3
*	Analcima		$\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6).\text{H}_2\text{O}$
*	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
Presencia de vidrio volcánico (0-20%)			

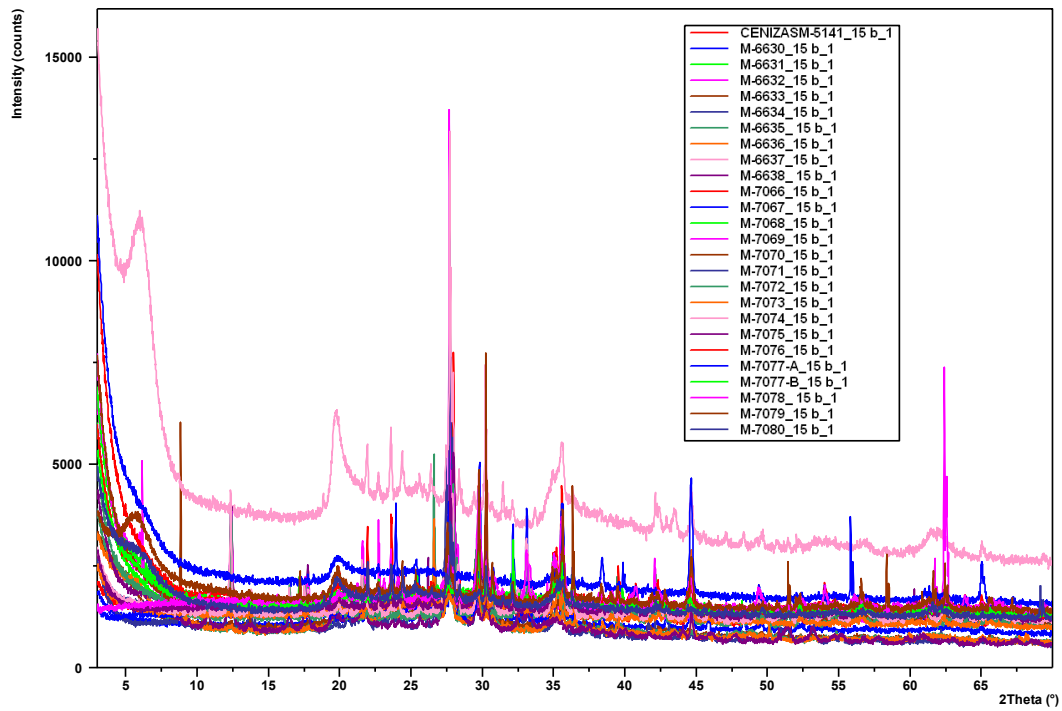
A-1.6.5.5.25 M-7080



Roca de composición básica compuesta principalmente por filosilicatos de la familia de las esmectitas, producto de alteración de la roca, plagioclasas (anortita y albita), acompañadas de clinopiroxenos (augita y hedembergita), e indicios de olivino (forsterita).

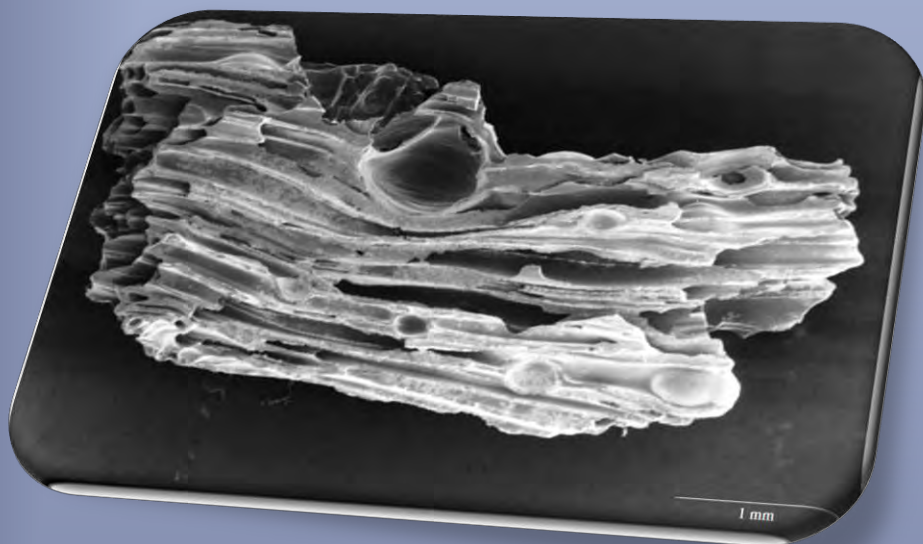
***	Filosilicatos	Esmectita	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$
***	Plagioclasas	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
		Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
***	Clinopiroxenos	Augita	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
		Hedembergita	$\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$
**	Olivino	Forsterita	Mg_2SiO_4
Roca rica en hierro (20-50%)			

A-1.6.5.5.26 Análisis comparativo



A-1.6.5.6 TABLA RESUMEN

Muestra	VIDRIO VOLCÁNICO (%)	Olivinos	Feldespatoides	Clinopiroxenos	Óxidos Fe/Ti	Feldespatos	Zeolitas	Filosilicatos	Carbonatos	Analcima	Rhonita
M-6630	20-50		*	**	*	***					
M-6631	0			**	**	***	***		*		
M-6632	0					***	***				
M-6633	20-50		**	***	*	***		**			
M-6634	0-20			*		***	***				
M-6635	20-50			**		**	*	***	*		
M-6636	20-50					**	***	***	*		
M-6637	20-50			*		**		***			
M-6638	0-20			*		**	***	***			
M-7066	0-20			***	**	**		*			*
M-7067	0		**	***	**	*					
M-7068	50-80	***									
M-7069	0-20	*		**			***				
M-7070	0-20	*		**		**	***				
M-7071	50-80	**		**							*
M-7072	0-20			***			**				*
M-7073	50-80	*		**	**			*		*	
M-7074	0			***	**	*	***				
M-7075	0	*		***	*	**					
M-7076	50-80			**	**						
M-7077	50-80				**						
M-7078	20-50		**	***	***	**					
M-7079	0-20	*		***	**			***		*	
M-7080	20-50	**		***		***		***			



ANEJO 2

FOTOGRAFÍAS MACRO Y MICRO ESCALA.

ÍNDICE

A-2.1	PIROCLASTOS REALES	1-3
A-2.1.1	POMEZ	1-3
A-2.1.1.1	M-6634	1-3
A-2.1.1.2	M-6638	1-4
A-2.1.2	LAPILLIS.....	1-6
A-2.1.2.1	M-3857	1-6
A-2.1.2.2	M-6631	1-7
A-2.1.2.3	M-6632	1-8
A-2.1.2.4	M-7067	1-9
A-2.1.2.5	M-7068	1-10
A-2.1.2.6	M-7069	1-11
A-2.1.2.7	M-7070	1-12
A-2.1.2.8	M-7071	1-13
A-2.1.2.9	M-7072	1-14
A-2.1.2.10	M-7073	1-15
A-2.1.2.11	M-7074	1-16
A-2.1.2.12	M-7075	1-17
A-2.1.2.13	M-7077	1-18
A-2.1.2.14	M-7078	1-19
A-2.1.2.15	LPT-07.....	1-20
A-2.1.3	CENIZAS	1-22
A-2.1.4	TOBACEAS.....	1-23
A-2.1.4.1	M-6633	1-23
A-2.1.4.2	M-7066	1-24
A-2.1.4.3	M-7076	1-25
A-2.1.4.4	M-7079	1-27
A-2.1.4.5	M-3856	1-28
A-2.1.5	ESCORIAS	1-29
A-2.2	PROBETAS ARTIFICIALES.....	2-30
A-2.2.1	CONGLOMERANTE	2-30

A-2.2.1.1	ESCAYOLA+AGUA (EPA).....	2-30
A-2.2.1.2	CEMENTO+AGUA (CM).....	2-31
A-2.2.1.3	CEMENTO+AGUA+BENTONITA (CB).....	2-32
A-2.2.2	PROBETAS ARTIFICIALES.....	2-33
A-2.2.2.1	BCAP (BENTONITA-CEMENTO-ARLITA-POREXPAN)	2-33
A-2.2.2.2	BCP (BENTONITA-CEMENTO-POREXPAN)	2-34

A-2.1 PIROCLASTOS REALES.

En este anejo se presentan las fotografías de las muestras más representativas ensayadas los cuatro años de estudio. Se incluyen las fotografías realizadas con el microscopio de mano.

Se ha dividido en función del tipo de piroclasto: pómez, lapillis y tobaceas (materiales re trabajados de diferentes maneras).

A-2.1.1 POMEZ.

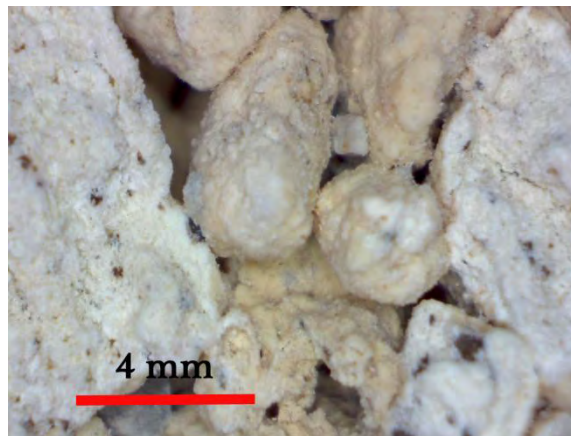
Estas probetas se tallaron a mano debido a que no se desmoronan al tallarlas a máquina.

A-2.1.1.1 M-6634



A-2.1.1.2 M-6638





A-2.1.2 LAPILLIS.

A partir de la muestra 7070, se congelaron los bloques debido a la imposibilidad de obtener muestras mediante la máquina sacatestigos.

A-2.1.2.1 M-3857



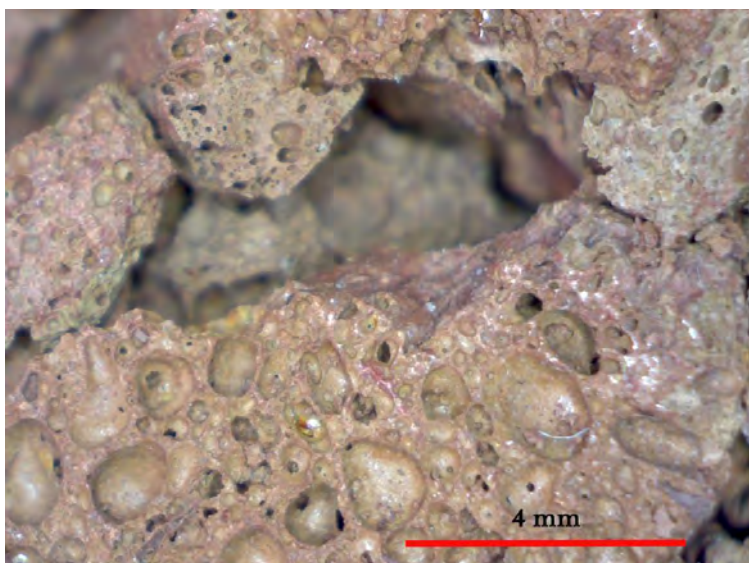
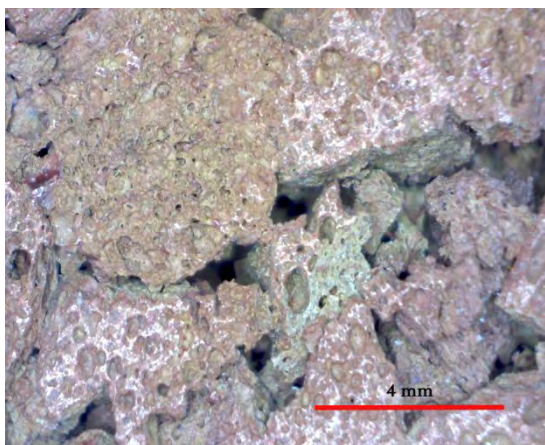
A-2.1.2.2 M-6631



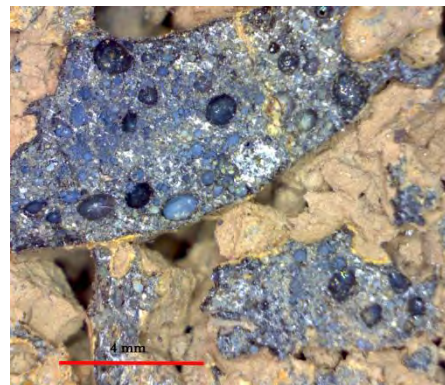
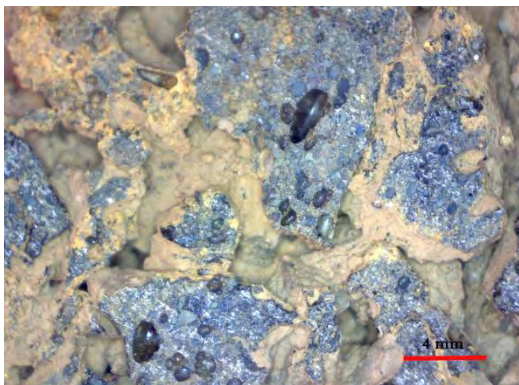
A-2.1.2.3 M-6632



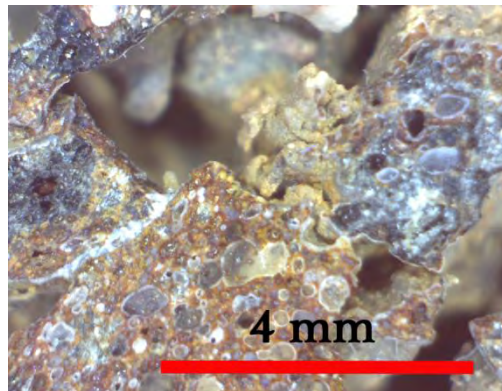
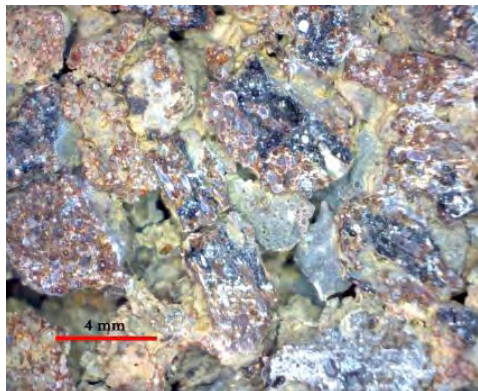
A-2.1.2.4 M-7067



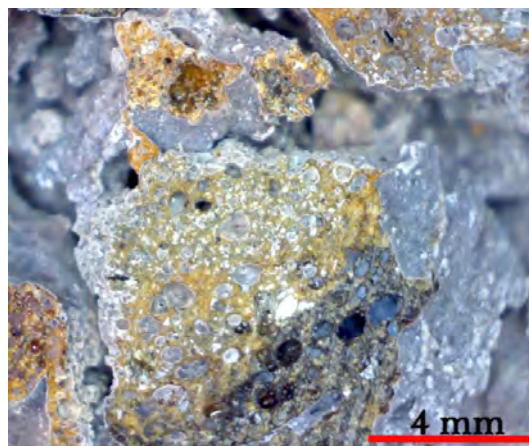
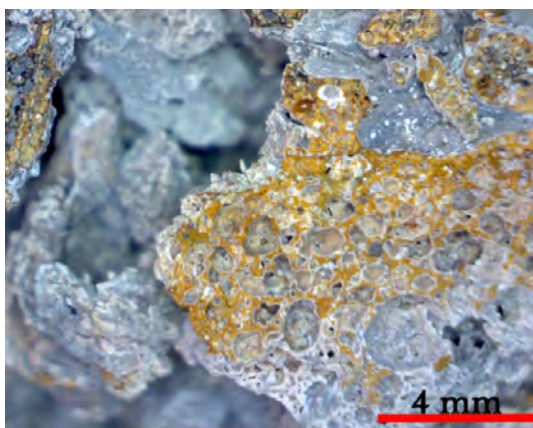
A-2.1.2.5 M-7068



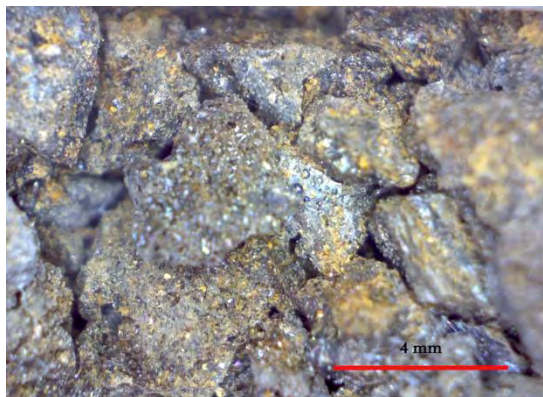
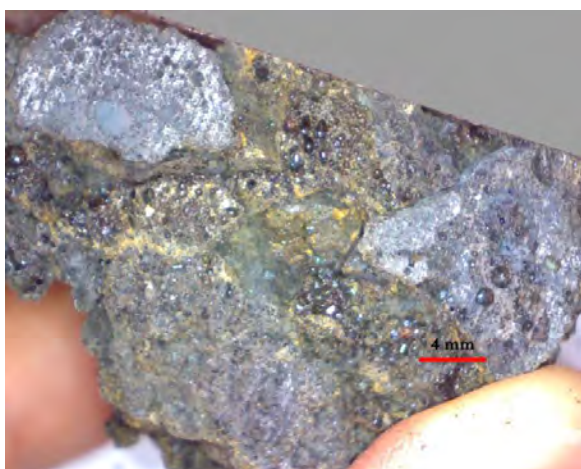
A-2.1.2.6 M-7069



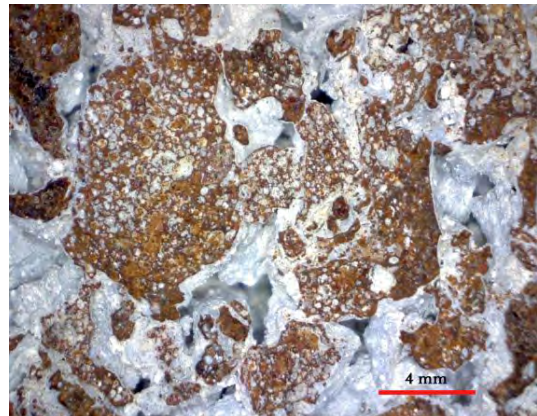
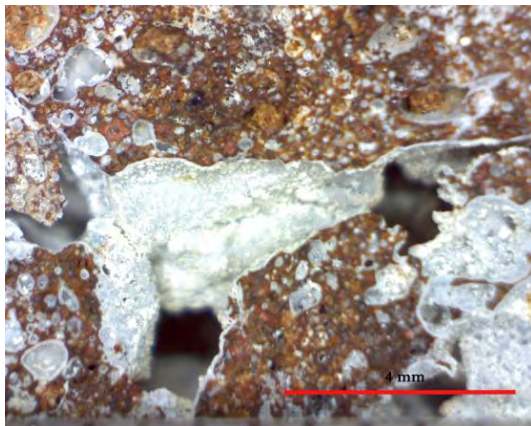
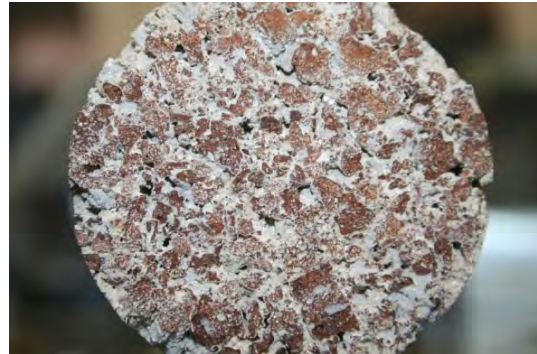
A-2.1.2.7 M-7070



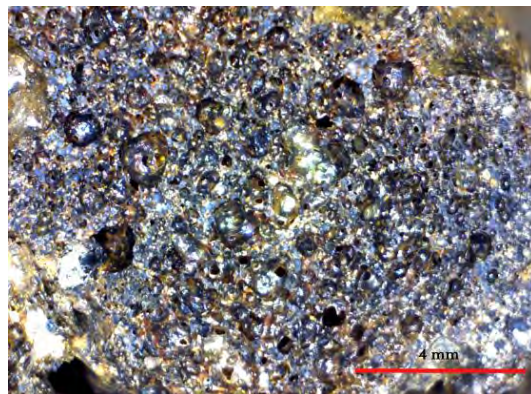
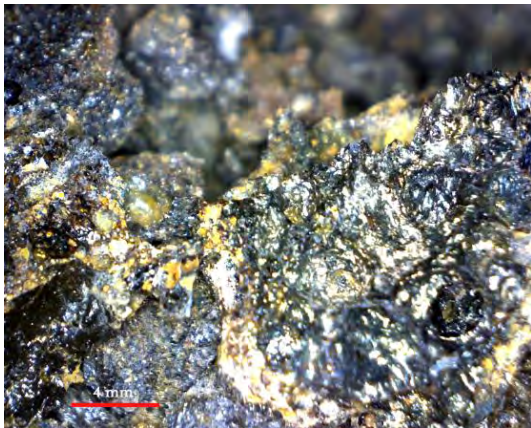
A-2.1.2.8 M-7071



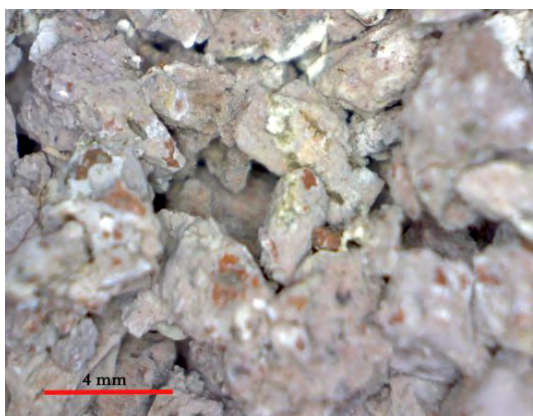
A-2.1.2.9 M-7072



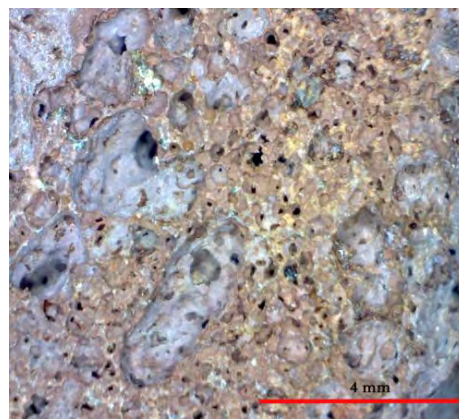
A-2.1.2.10 M-7073



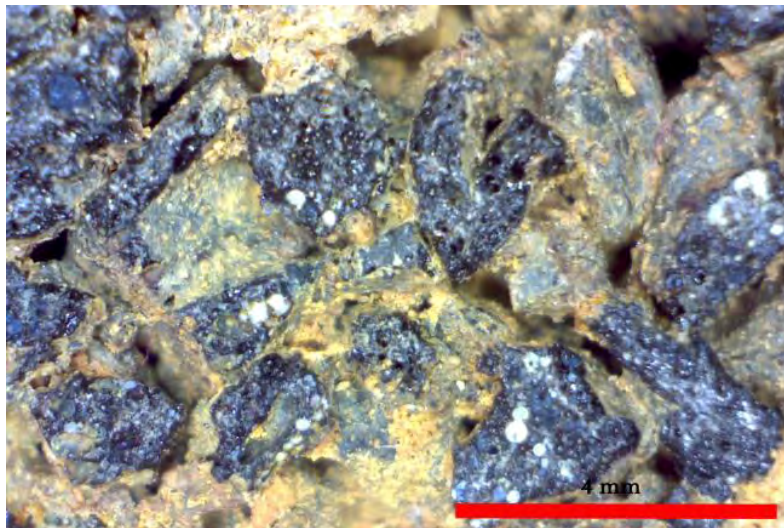
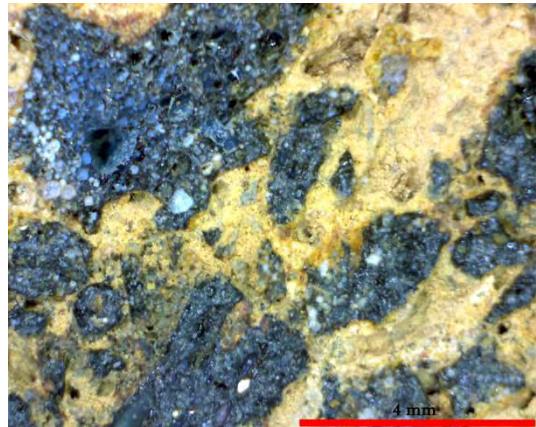
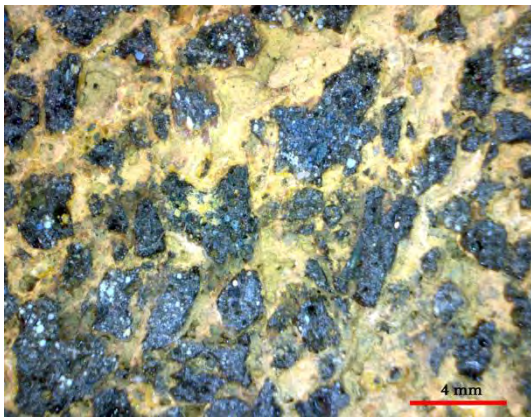
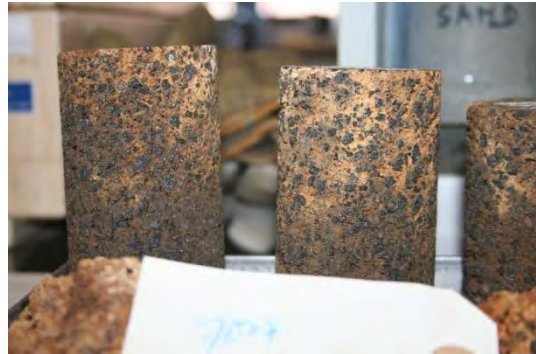
A-2.1.2.11 M-7074



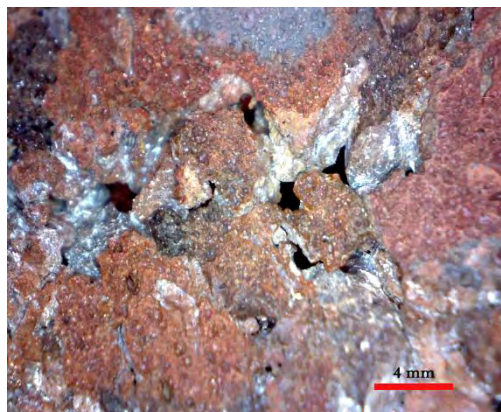
A-2.1.2.12 M-7075



A-2.1.2.13 M-7077



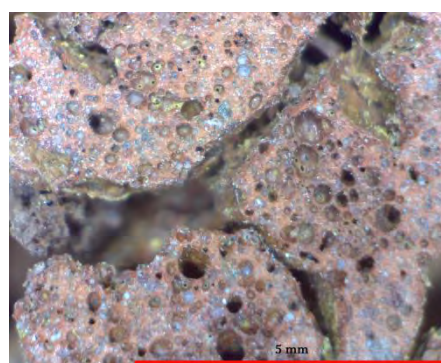
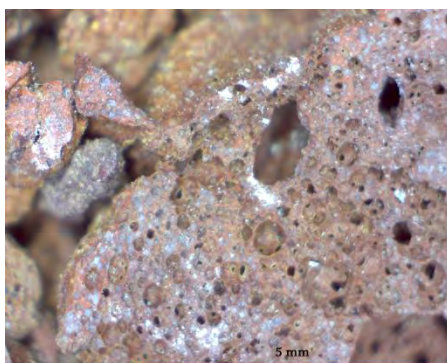
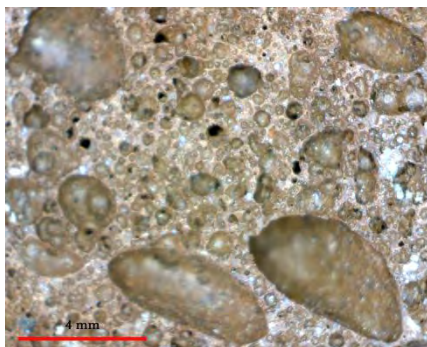
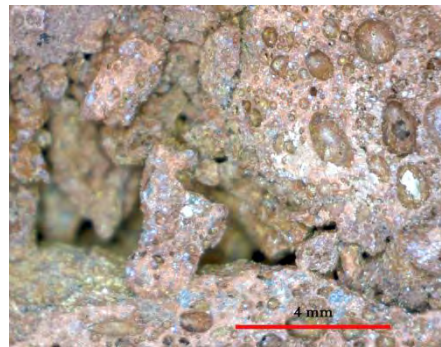
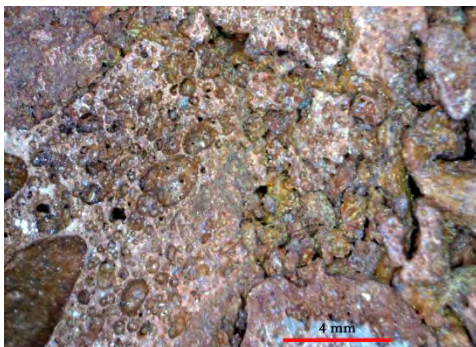
A-2.1.2.14 M-7078



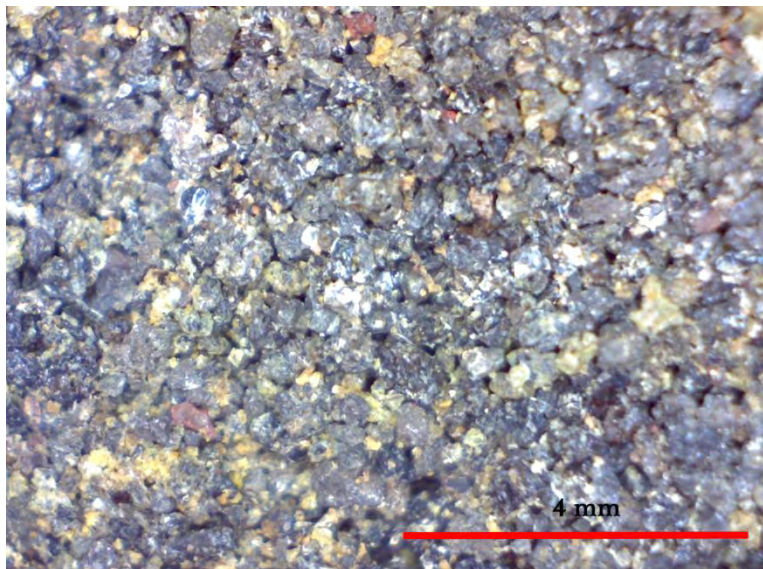
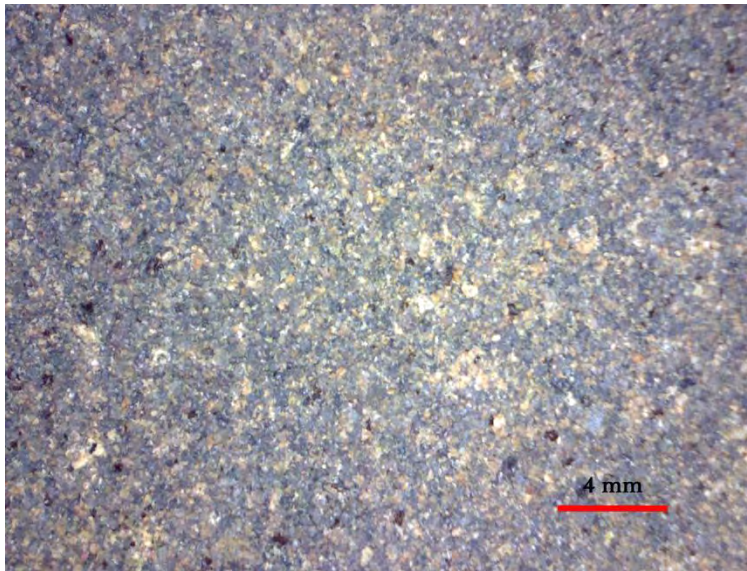
A-2.1.2.15 LPT-07



Caracterización geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad.

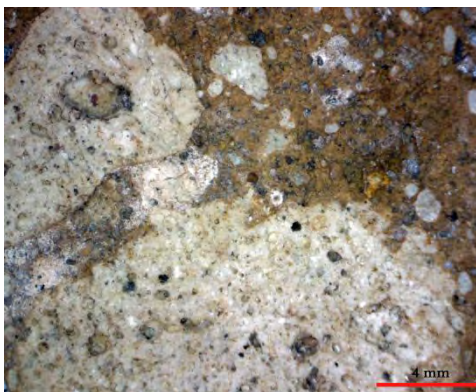


A-2.1.3 CENIZAS.



A-2.1.4 TOBACEAS.

A-2.1.4.1 M-6633

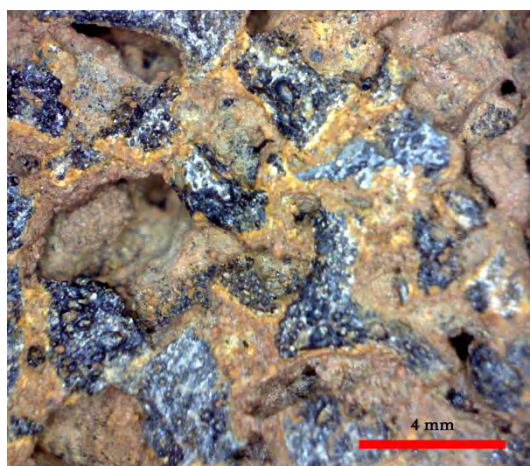
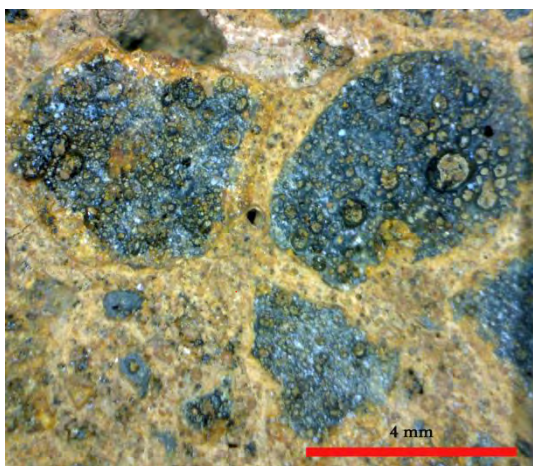


A-2.1.4.2 M-7066

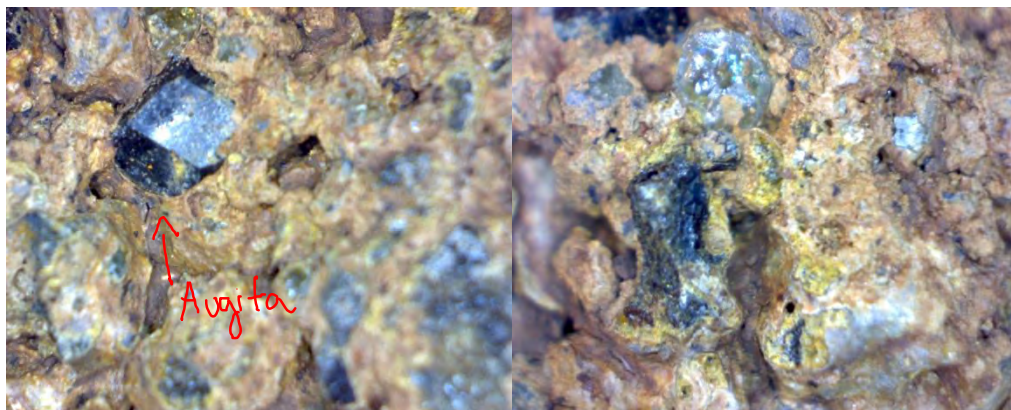


A-2.1.4.3 M-7076





A-2.1.4.4 M-7079



A-2.1.4.5 M-3856



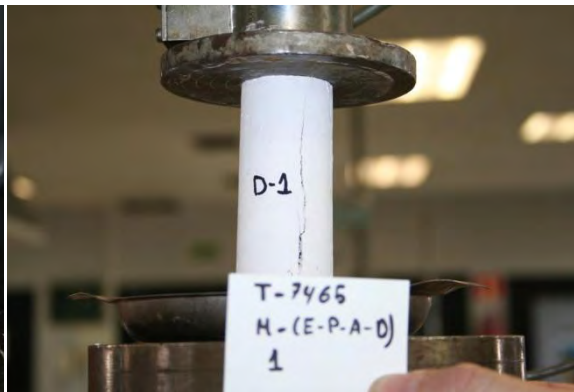
A-2.1.5 ESCORIAS.



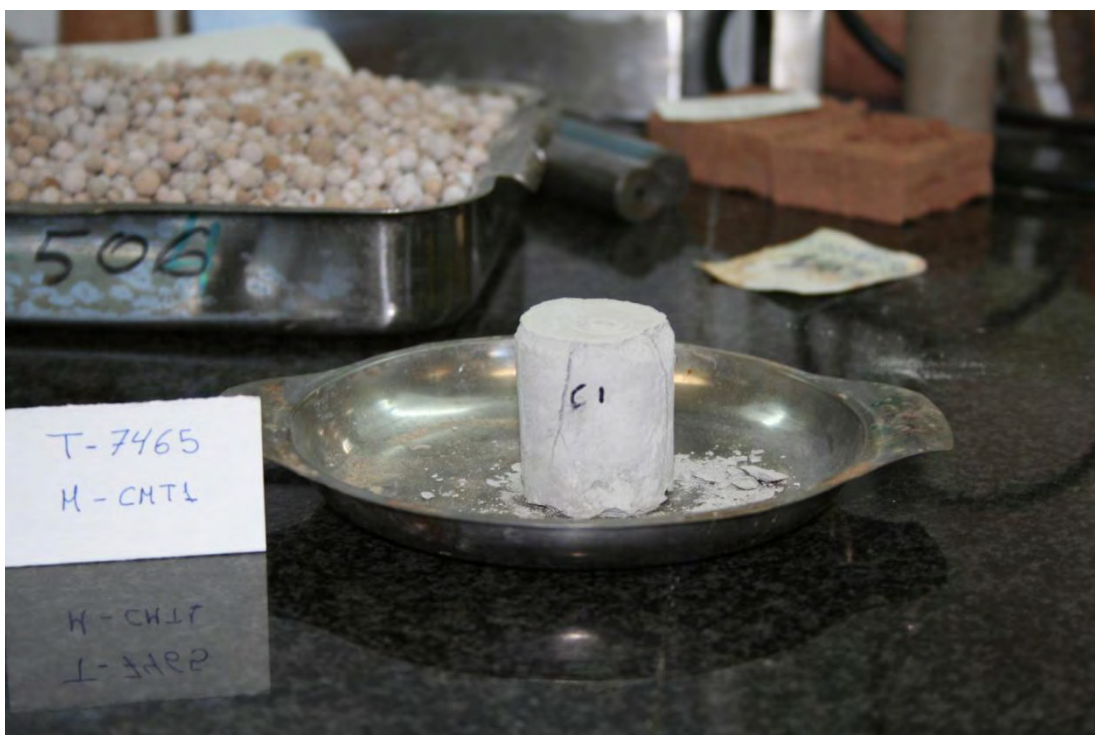
A-2.2 PROBETAS ARTIFICIALES.

A-2.2.1 CONGLOMERANTE

A-2.2.1.1 ESCAYOLA+AGUA (EPA)



A-2.2.1.2 CEMENTO+AGUA (CM)

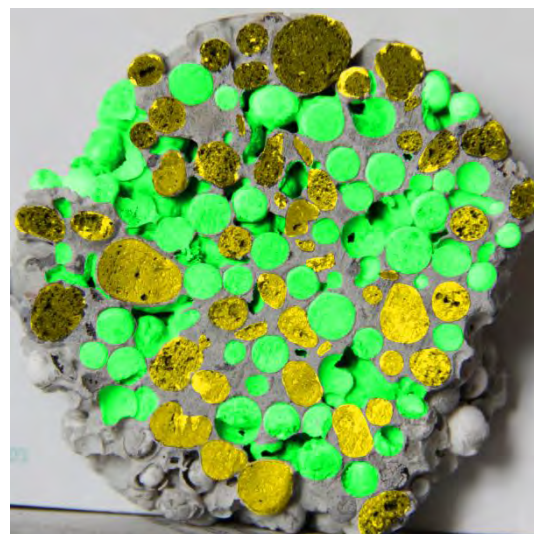
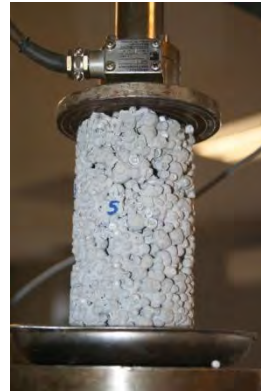


A-2.2.1.3 CEMENTO+AGUA+BENTONITA (CB)

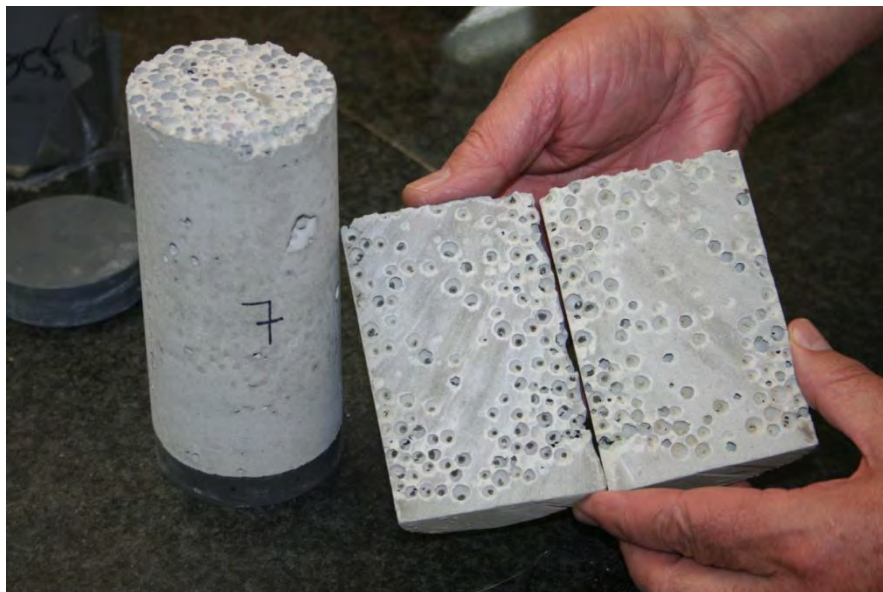
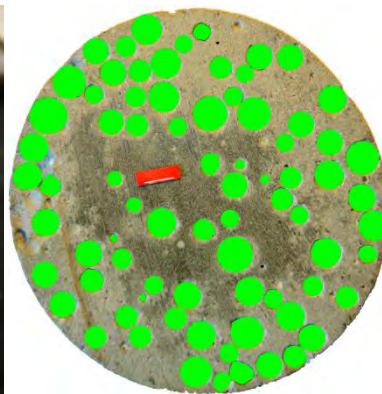


A-2.2.2 PROBETAS ARTIFICIALES

A-2.2.2.1 BCAP (BENTONITA-CEMENTO-ARLITA-POREXPAN)



A-2.2.2.2 BCP (BENTONITA-CEMENTO-POREXPAN)





ANEJO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN
LABORATORIO. MUESTRAS ARTIFICIALES Y REALES.

ÍNDICE

A-3.1	MUESTRAS ARTIFICIALES	1-3
A-3.1.1	Ensayo de compresión simple.	1-3
A-3.1.1.1	Estadística descriptiva:	1-3
A-3.1.1.2	Histogramas de frecuencia:	1-3
A-3.1.1.3	Ajuste distribución de probabilidad:	1-4
A-3.1.2	Ensayo de compresión isotrópica.	1-5
A-3.1.2.1	Estadística descriptiva:	1-5
A-3.1.2.2	Histogramas de frecuencia:	1-5
A-3.1.2.3	Ajuste distribución de probabilidad:	1-6
A-3.1.3	Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=50$).	1-7
A-3.1.3.1	Estadística descriptiva:	1-7
A-3.1.3.2	Histograma de frecuencia:	1-7
A-3.1.3.3	Ajuste distribución de probabilidad:	1-8
A-3.1.4	Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=100$).	1-9
A-3.1.4.1	Estadística descriptiva:	1-9
A-3.1.4.2	Histograma de frecuencia:	1-9
A-3.1.4.3	Ajuste curva de distribución:	1-10
A-3.1.5	Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=160$).	1-11
A-3.1.5.1	Estadística descriptiva:	1-11
A-3.1.5.2	Histograma de frecuencia:	1-11
A-3.1.5.3	Ajuste curva de distribución:	1-12
A-3.1.6	Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=200$).	1-13
A-3.1.6.1	Estadística descriptiva:	1-13
A-3.1.6.2	Histograma de frecuencia:	1-13
A-3.1.6.3	Ajuste curva de distribución:	1-14
A-3.1.7	Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=250$).	1-15
A-3.1.7.1	Estadística descriptiva:	1-15
A-3.1.7.2	Histograma de frecuencia:	1-15
A-3.1.7.3	Ajuste curva de distribución:	1-16
A-3.2	PIROCLASTOS REALES	2-17
A-3.2.1	Ensayo de compresión simple.	2-17

A-3.2.1.1	Estadística descriptiva:	2-17
A-3.2.1.2	Histogramas de frecuencia:	2-17
A-3.2.1.3	Ajuste distribución de probabilidad:	2-18
A-3.2.2	Ensayo de compresión isotropa.	2-19
A-3.2.2.1	Estadística descriptiva:	2-19
A-3.2.2.2	Histogramas de frecuencia:	2-19
A-3.2.2.3	Ajuste distribución de probabilidad:	2-20
A-3.2.3	Densidades de muestras reales.	2-21
A-3.2.3.1	Estadística descriptiva:	2-21
A-3.2.3.2	Histogramas de frecuencia:	2-21
A-3.2.3.3	Ajuste distribución de probabilidad:	2-22
A-3.2.4	Porosidades de los piroclastos canarios.	2-23
A-3.2.4.1	Estadística descriptiva:	2-23
A-3.2.4.2	Histogramas de frecuencia:	2-23
A-3.2.4.3	Ajuste distribución de probabilidad:	2-24

A-3.1 MUESTRAS ARTIFICIALES

Para el análisis estadístico se utilizaron tres programas:

- EasyFit 5.5
- @Risk 5.5.1
- StatTools 5.5.1

Para la estadística descriptiva se eligieron los resultados de EasyFit, el histograma de frecuencia se obtuvo mediante el StatTools y las funciones de distribución de los distintos ensayos se obtuvieron mediante el programa @Risk.

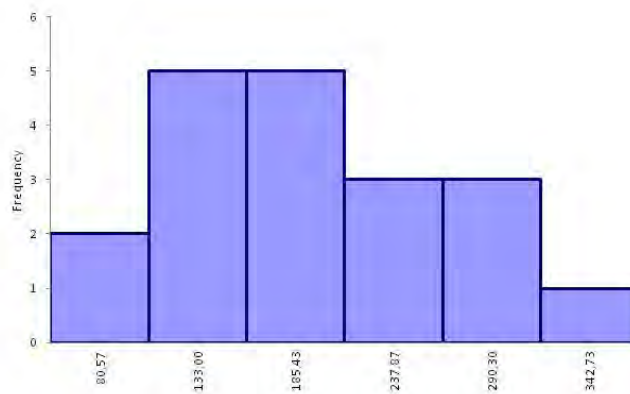
Los resultados de los ensayos están en kPa.

A-3.1.1 Ensayo de compresión simple.

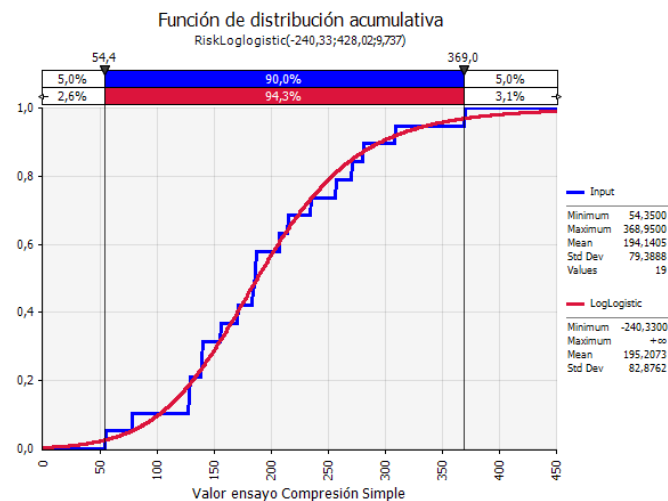
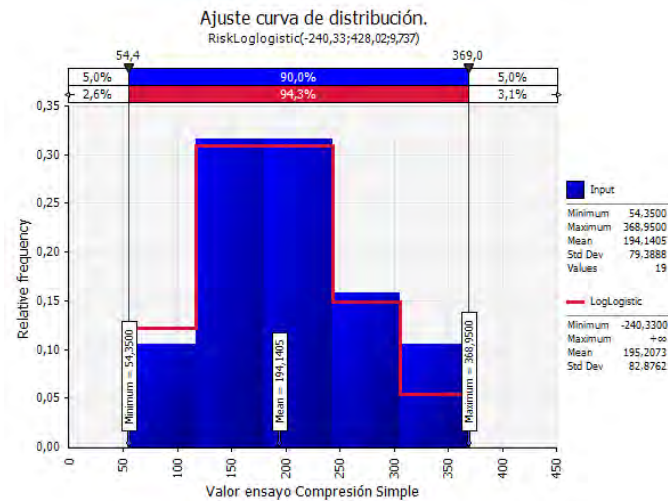
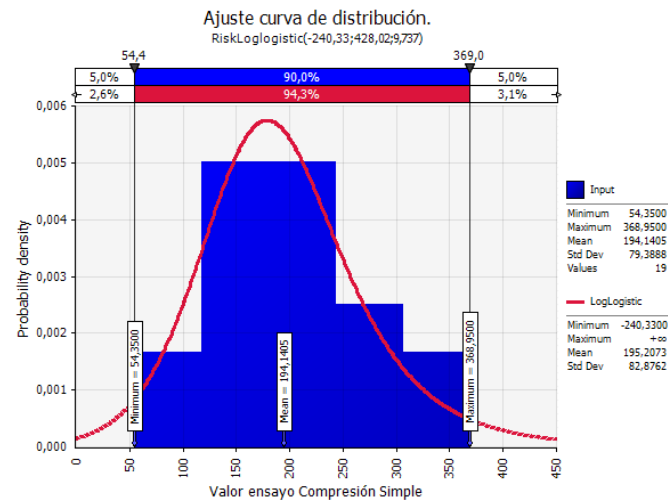
A-3.1.1.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	19	Min	54,35
Rango	314,6	5%	54,35
Media	194,14	10%	78
Varianza	6302,6	25% (Q1)	138,12
Desviación estándar	79,389	50% (Mediana)	185,21
Coef. de variación	0,40892	75% (Q3)	256,73
Error estándar	18,213	90%	308,82
Asimetría	0,36862	95%	368,95
Curtosis	0,01923	Max	368,95

A-3.1.1.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.1.1.3 Ajuste distribución de probabilidad:

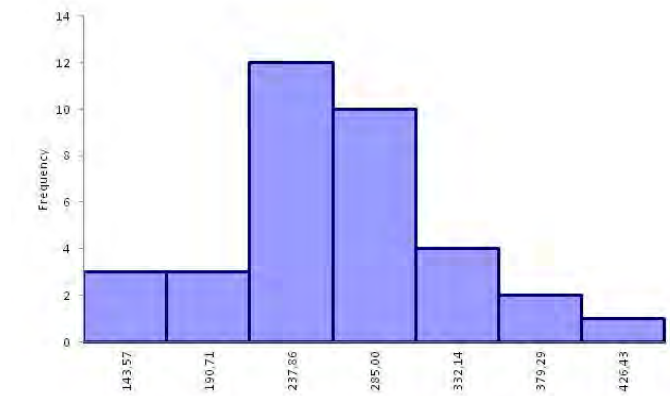


A-3.1.2 Ensayo de compresión isotropa.

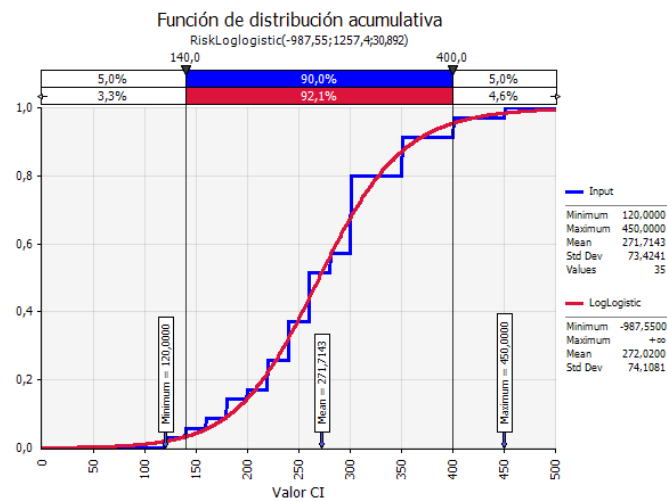
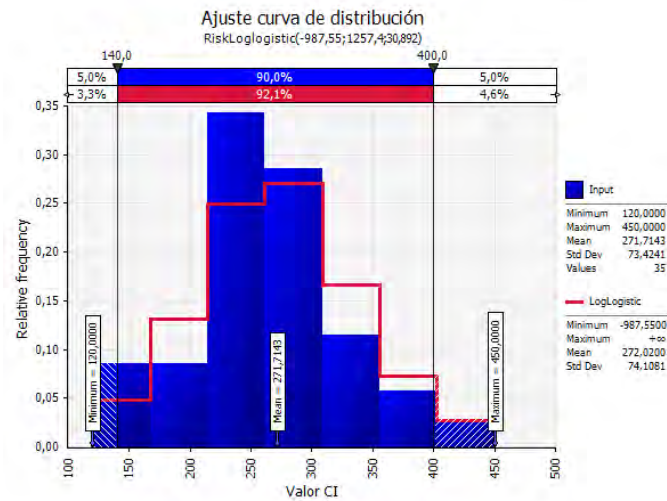
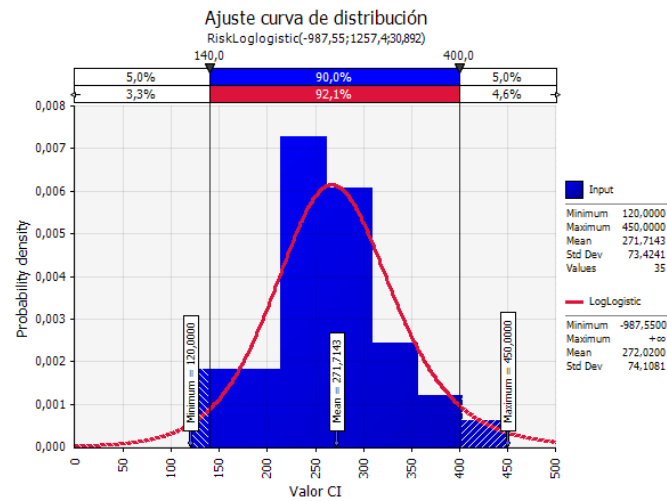
A-3.1.2.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	35	Min	120
Rango	330	5%	136,0
Media	271,71	10%	172,0
Varianza	5391,1	25% (Q1)	220
Desviación estándar	73,424	50% (Mediana)	260
Coef. de variación	0,27023	75% (Q3)	300
Error estándar	12,411	90%	370,0
Asimetría	0,18576	95%	410,0
Curtosis	0,20242	Max	450

A-3.1.2.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.1.2.3 Ajuste distribución de probabilidad:

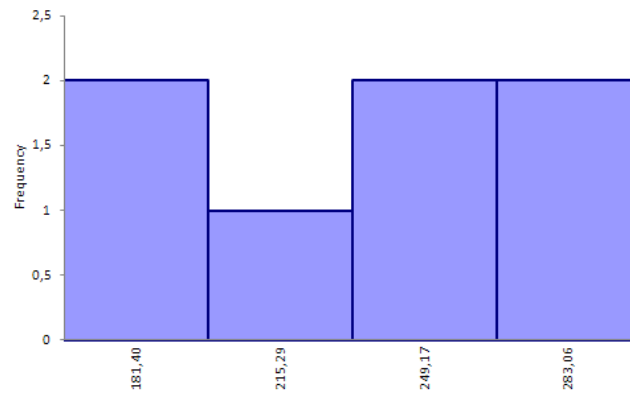


A-3.1.3 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=50$).

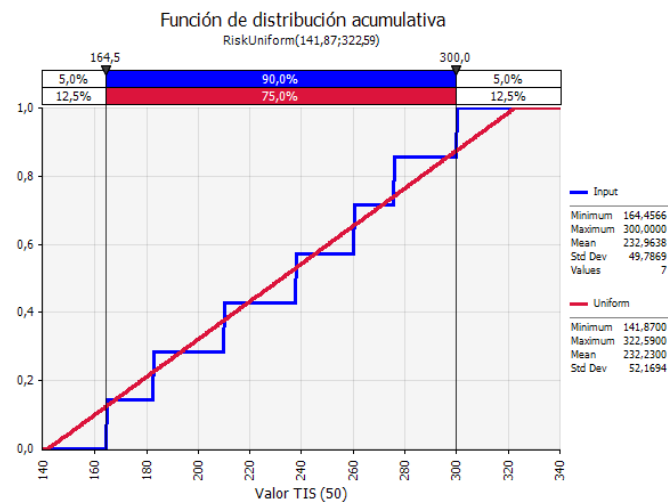
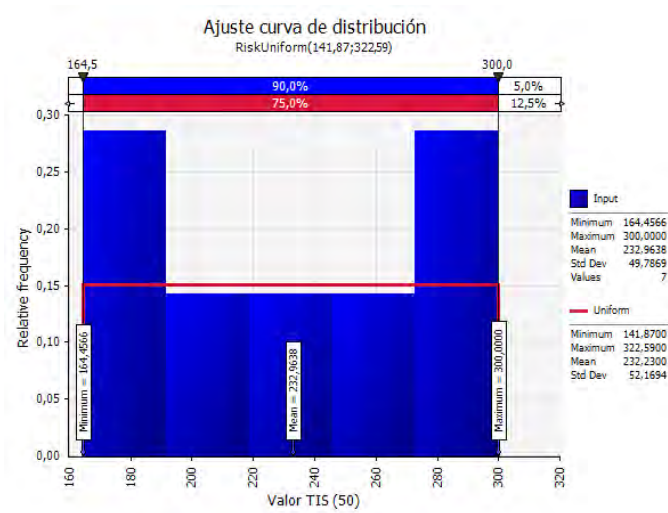
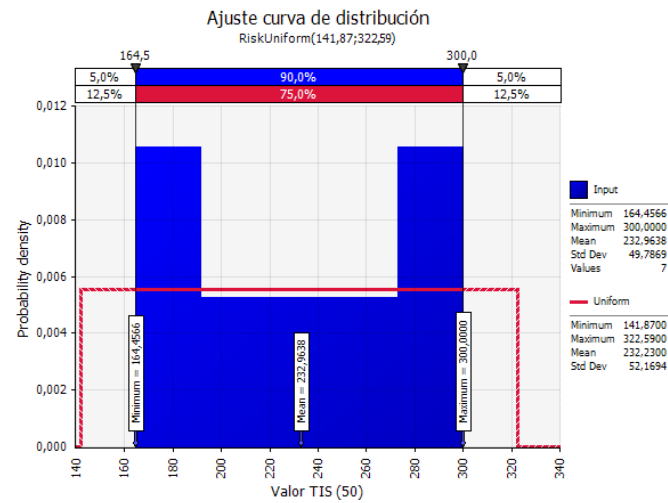
A-3.1.3.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	7	Min	164,46
Rango	135,54	5%	164,46
Media	232,96	10%	164,46
Varianza	2478,7	25% (Q1)	182,5
Desviación estándar	49,787	50% (Mediana)	237,5
Coef. de variación	0,21371	75% (Q3)	275,74
Error estándar	18,818	90%	300
Asimetría	-0,11634	95%	300
Curtosis	-1,3811	Max	300

A-3.1.3.2 Histograma de frecuencia:



A-3.1.3.3 Ajuste distribución de probabilidad:

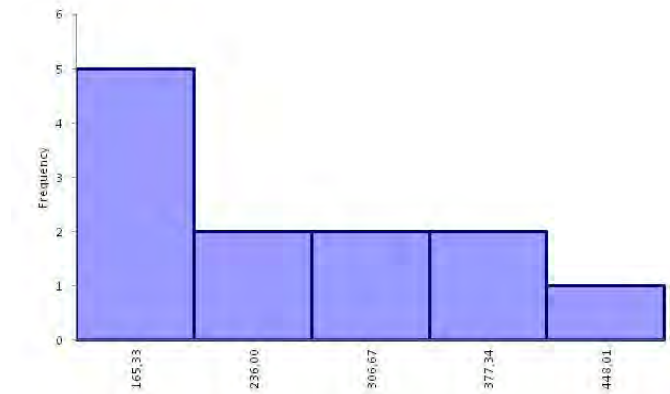


A-3.1.4 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=100$).

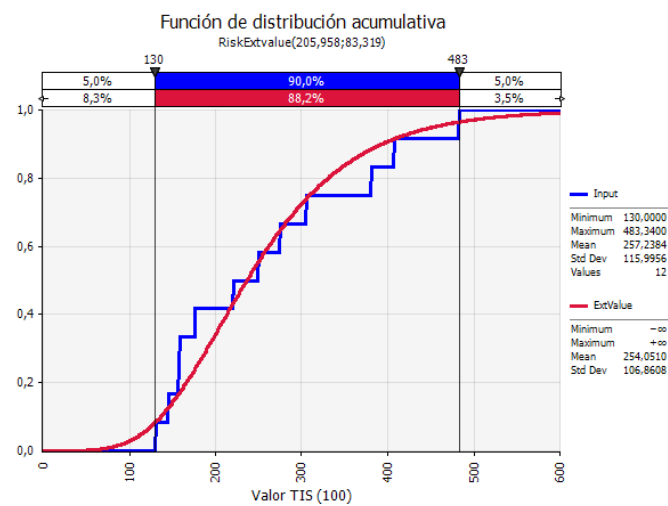
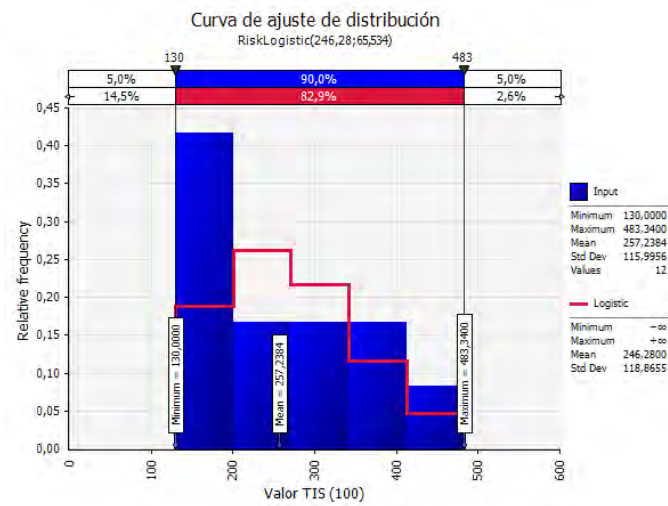
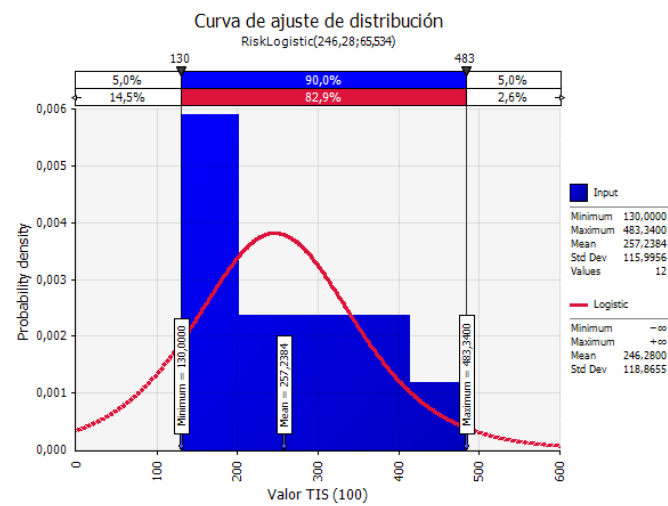
A-3.1.4.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	12	Min	130
Rango	353,34	5%	130
Media	257,24	10%	134,5
Varianza	13455,0	25% (Q1)	156,92
Desviación estándar	116,0	50% (Mediana)	235,52
Coef. de variación	0,45093	75% (Q3)	361,08
Error estándar	33,485	90%	460,59
Asimetría	0,75916	95%	483,34
Curtosis	-0,53395	Max	483,34

A-3.1.4.2 Histograma de frecuencia:



A-3.1.4.3 Ajuste curva de distribución:

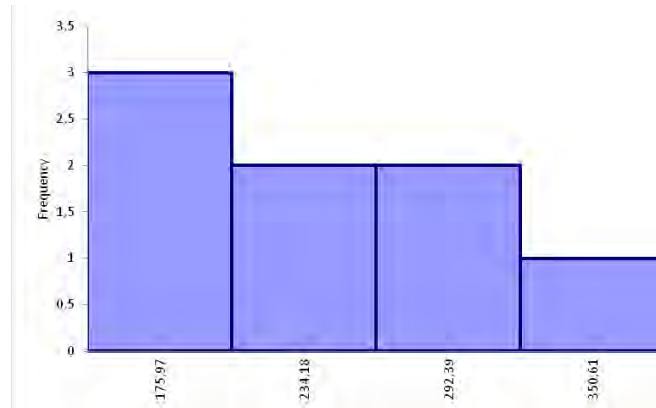


A-3.1.5 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=160$).

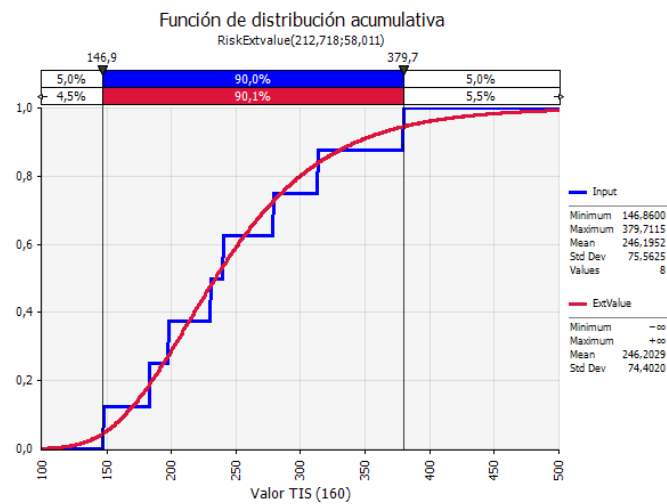
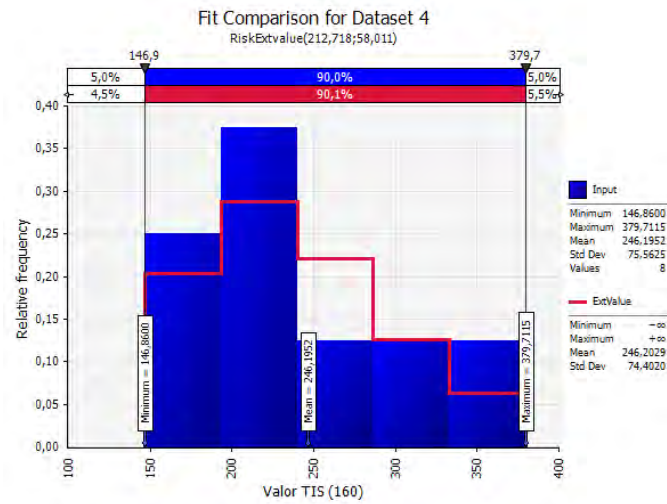
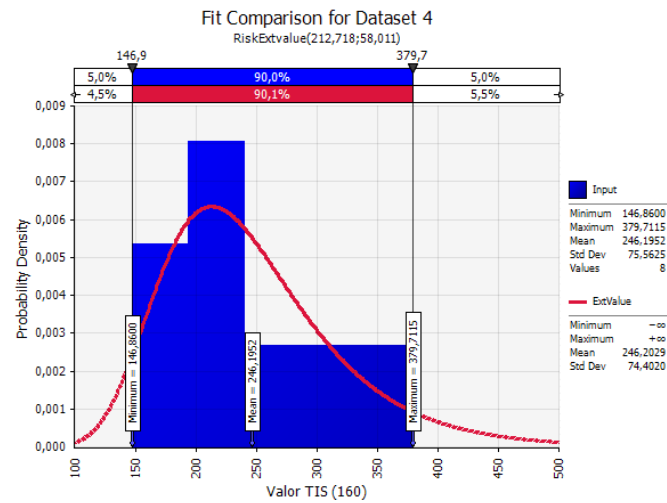
A-3.1.5.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	8	Min	146,86
Rango	232,85	5%	146,86
Media	246,2	10%	146,86
Varianza	5709,7	25% (Q1)	186,54
Desviación estándar	75,563	50% (Mediana)	235
Coef. de variación	0,30692	75% (Q3)	304,92
Error estándar	26,715	90%	379,71
Asimetría	0,6041	95%	379,71
Curtosis	-0,07618	Max	379,71

A-3.1.5.2 Histograma de frecuencia:



A-3.1.5.3 Ajuste curva de distribución:

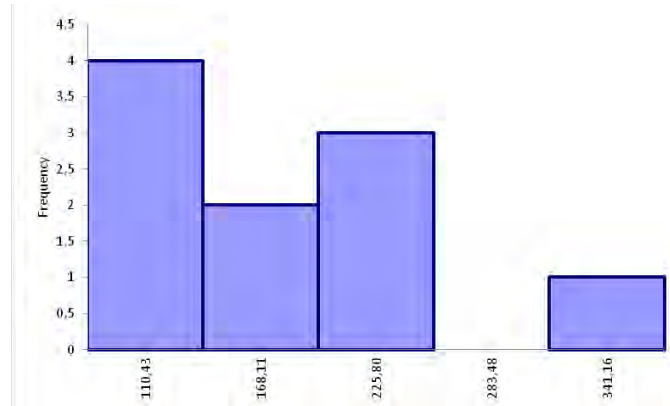


A-3.1.6 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=200$).

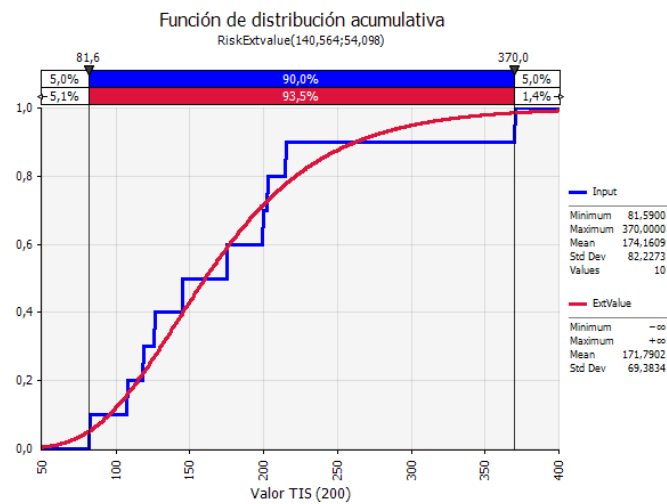
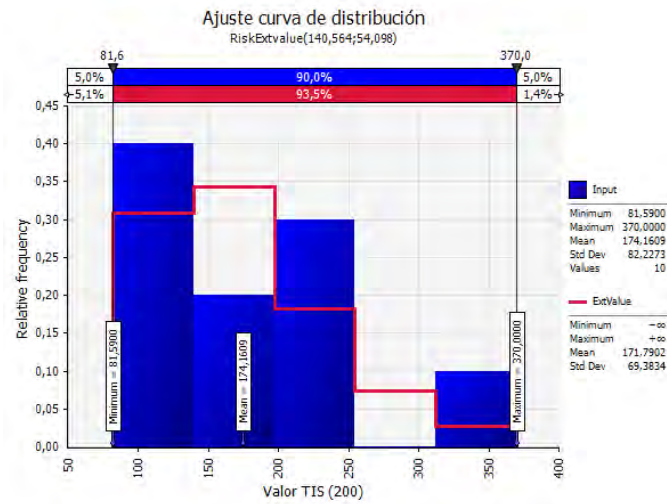
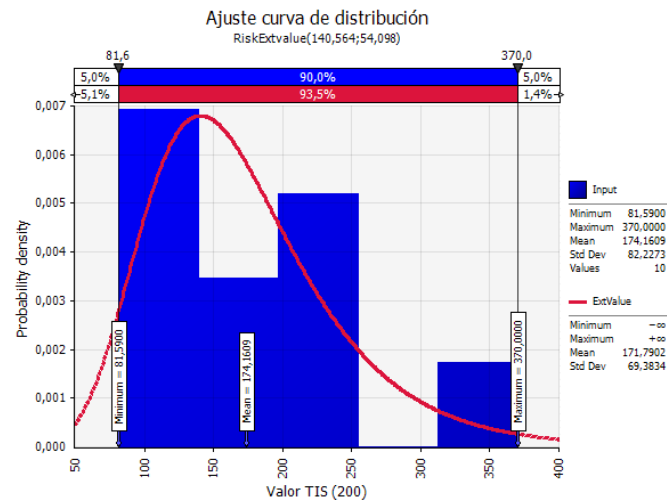
A-3.1.6.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	10	Min	81,59
Rango	288,41	5%	81,59
Media	174,16	10%	84,183
Varianza	6761,3	25% (Q1)	115,8
Desviación estándar	82,227	50% (Mediana)	159,9
Coef. de variación	0,47213	75% (Q3)	206,03
Error estándar	26,003	90%	354,54
Asimetría	1,5546	95%	370
Curtosis	3,2225	Max	370

A-3.1.6.2 Histograma de frecuencia:



A-3.1.6.3 Ajuste curva de distribución:

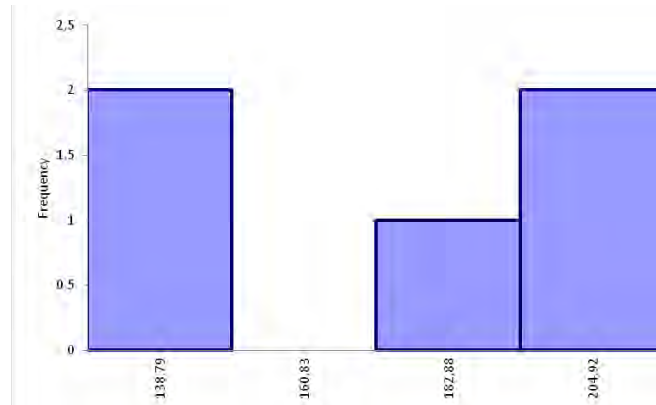


A-3.1.7 Ensayo triaxial TIS ($\sigma_3=250$).

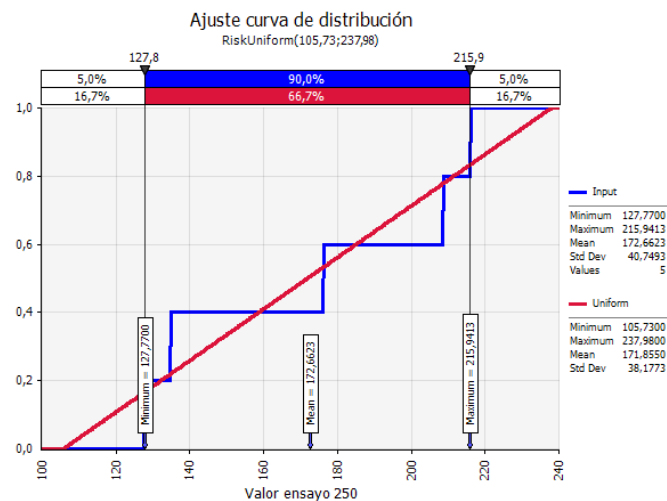
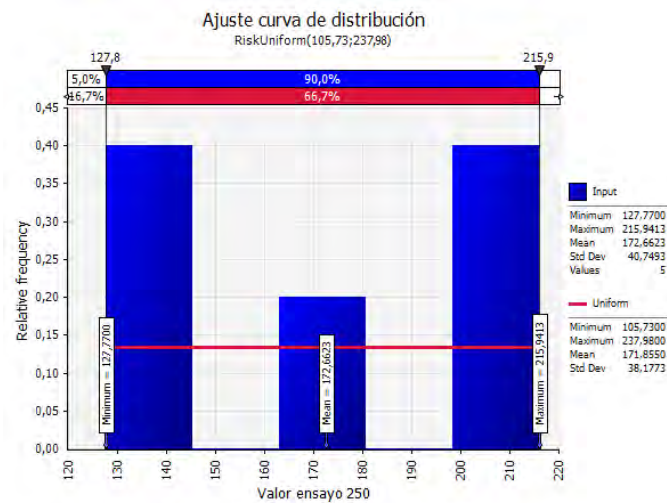
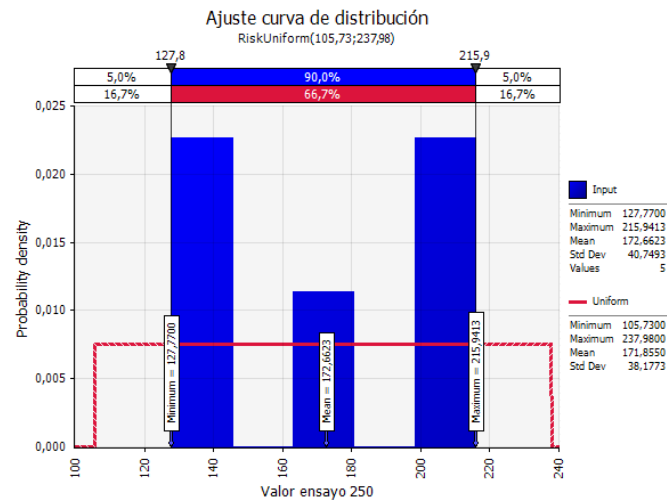
A-3.1.7.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	5	Min	127,77
Rango	88,171	5%	127,77
Media	172,66	10%	127,77
Varianza	1660,5	25% (Q1)	131,26
Desviación estándar	40,749	50% (Mediana)	176,09
Coef. de variación	0,23601	75% (Q3)	212,36
Error estándar	18,224	90%	215,94
Asimetría	-0,10362	95%	215,94
Curtosis	-2,86	Max	215,94

A-3.1.7.2 Histograma de frecuencia:



A-3.1.7.3 Ajuste curva de distribución:



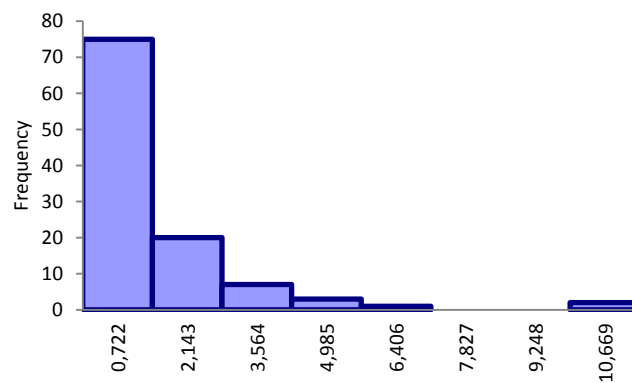
A-3.2 PIROCLASTOS REALES

A-3.2.1 Ensayo de compresión simple.

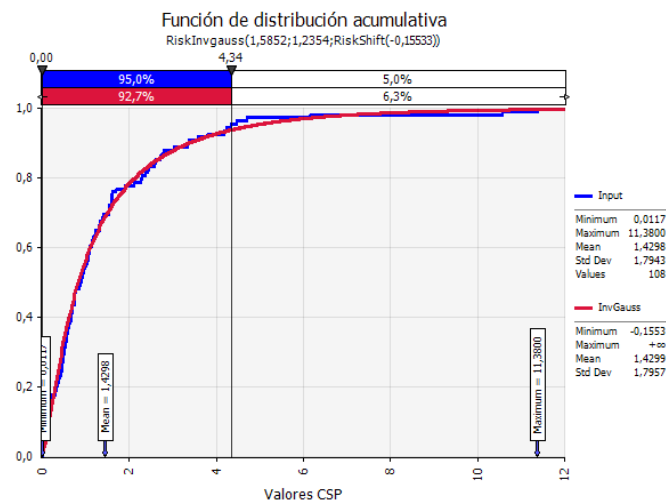
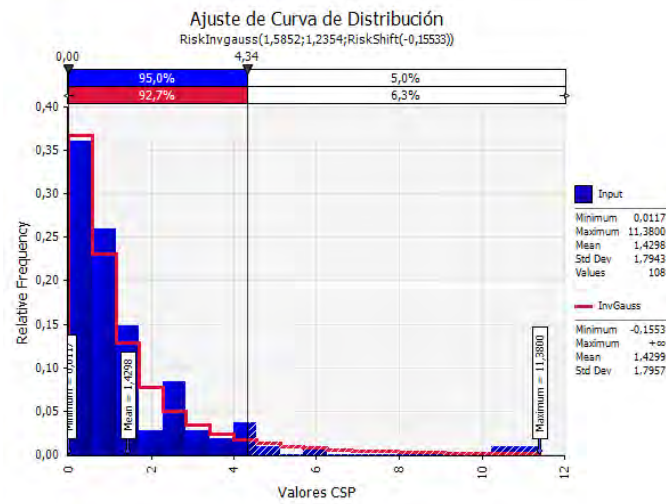
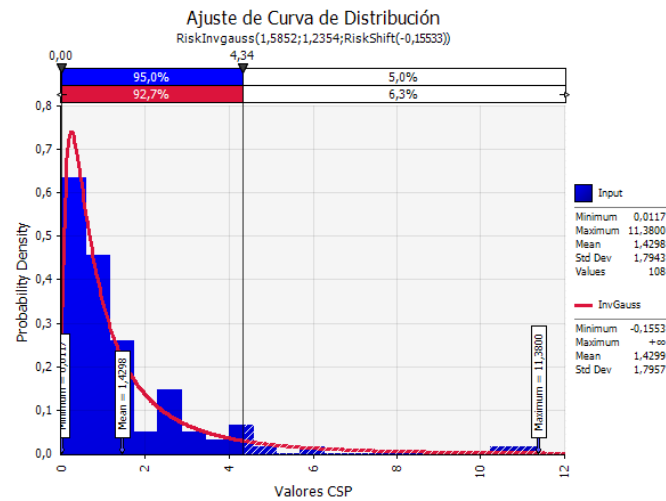
A-3.2.1.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	108	Min	0,0117
Rango	11,368	5%	0,05385
Media	1,4298	10%	0,1443
Varianza	3,2195	25% (Q1)	0,4303
Desviación estándar	1,7943	50% (Mediana)	0,885
Coef. de variación	1,2549	75% (Q3)	1,6205
Error estándar	0,17266	90%	3,409
Asimetría	3,2469	95%	4,4115
Curtosis	13,936	Max	11,38

A-3.2.1.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.2.1.3 Ajuste distribución de probabilidad:

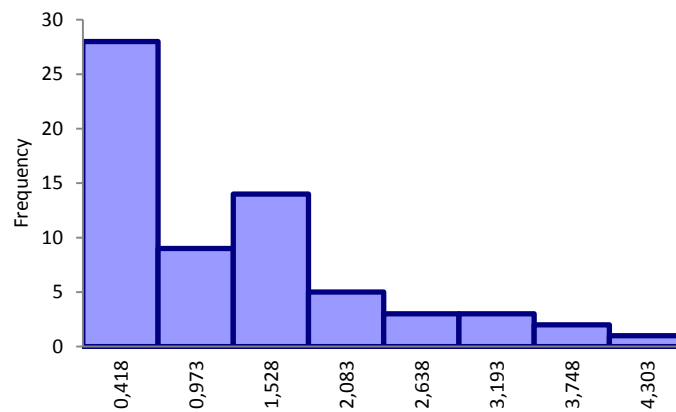


A-3.2.2 Ensayo de compresión isotropa.

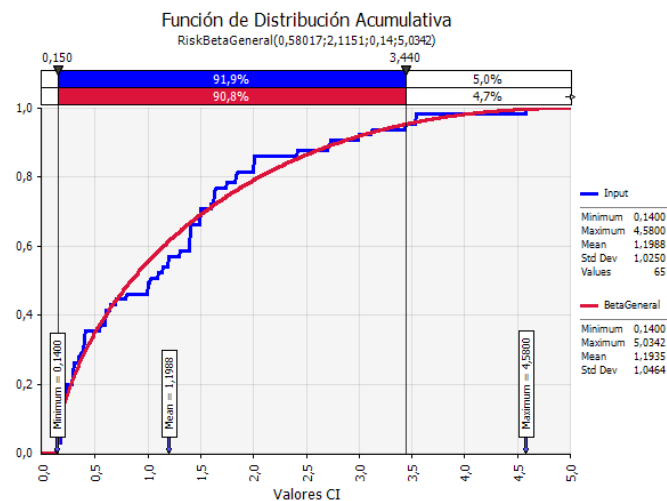
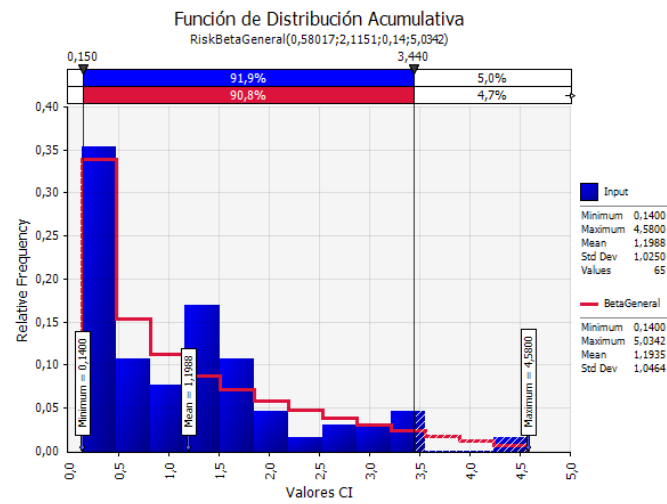
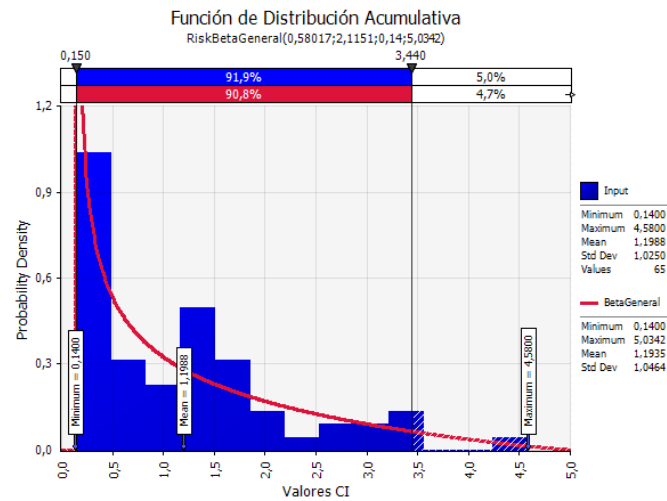
A-3.2.2.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	65	Min	0,14
Rango	4,44	5%	0,18
Media	1,1988	10%	0,192
Varianza	1,0507	25% (Q1)	0,3
Desviación estándar	1,025	50% (Mediana)	1,019
Coef. de variación	0,85509	75% (Q3)	1,6355
Error estándar	0,12714	90%	2,838
Asimetría	1,179	95%	3,503
Curtosis	1,095	Max	4,58

A-3.2.2.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.2.2.3 Ajuste distribución de probabilidad:

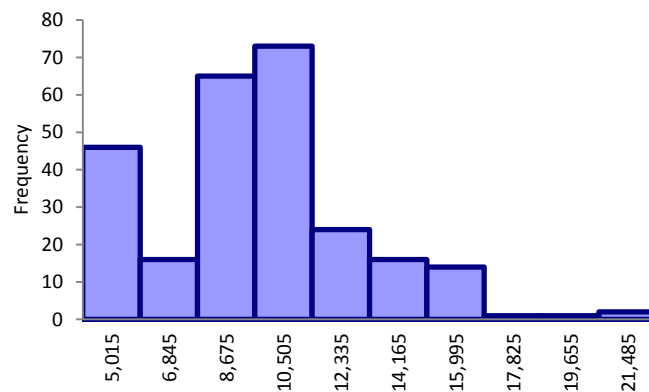


A-3.2.3 Densidades de muestras reales.

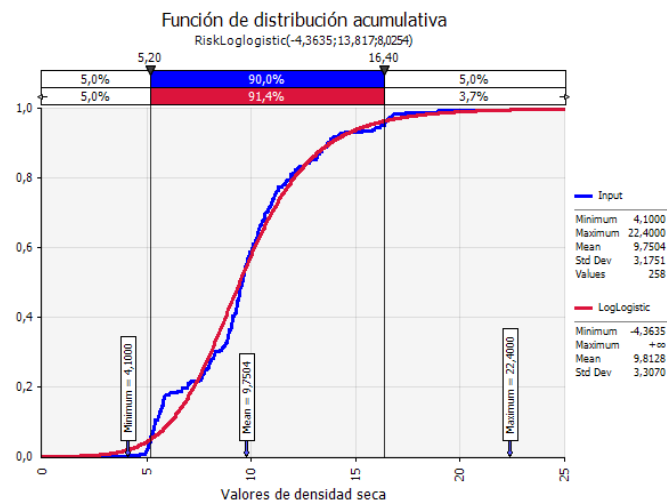
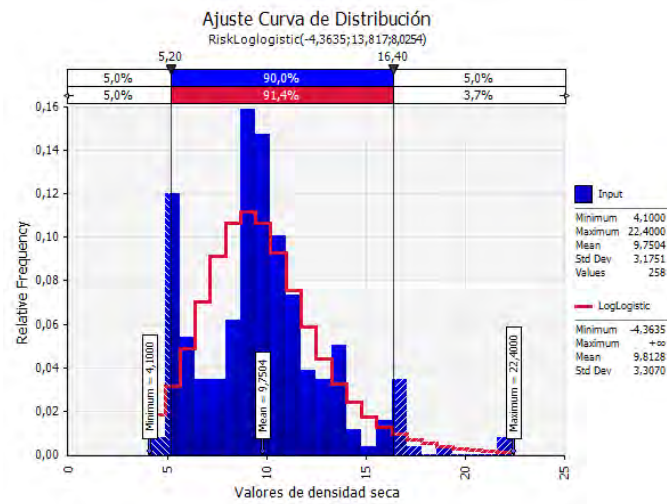
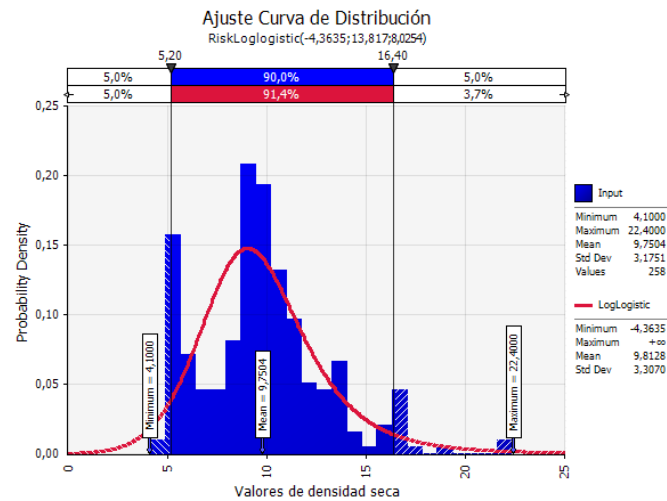
A-3.2.3.1 Estadística descriptiva:

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	258	Min	4,1
Rango	18,3	5%	5,199
Media	9,7504	10%	5,4
Varianza	10,081	25% (Q1)	7,875
Desviación estándar	3,1751	50% (Mediana)	9,6
Coef. de variación	0,32564	75% (Q3)	11,107
Error estándar	0,19767	90%	13,71
Asimetría	0,78896	95%	16,4
Curtosis	1,3481	Max	22,4

A-3.2.3.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.2.3.3 Ajuste distribución de probabilidad:

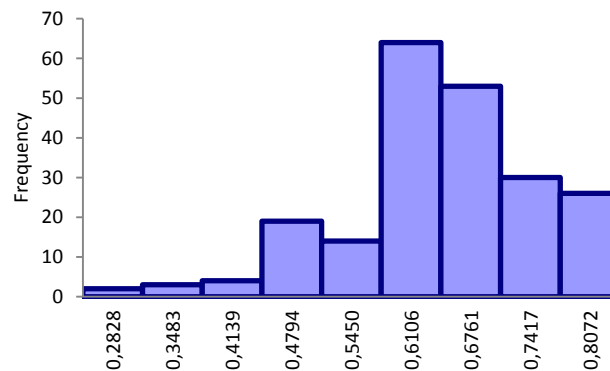


A-3.2.4 Porosidades de los piroclastos canarios.

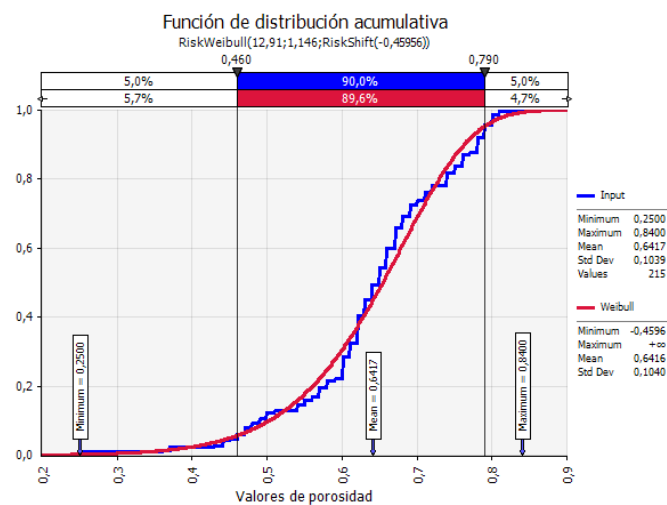
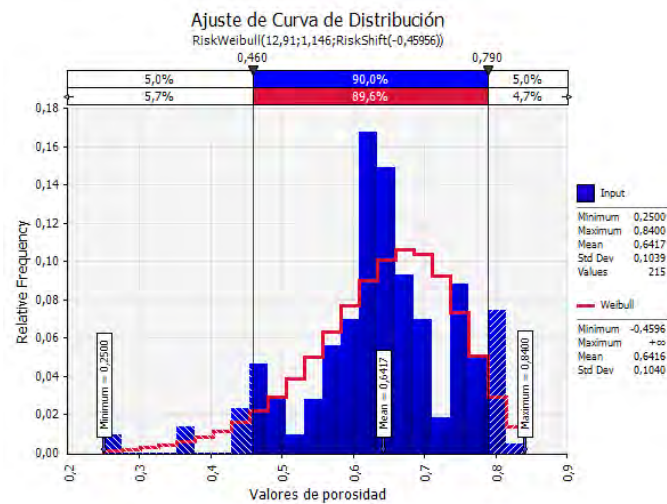
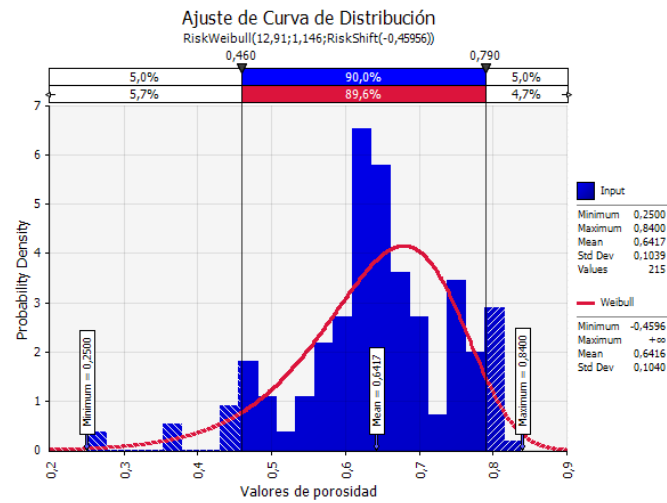
A-3.2.4.1 Estadística descriptiva:

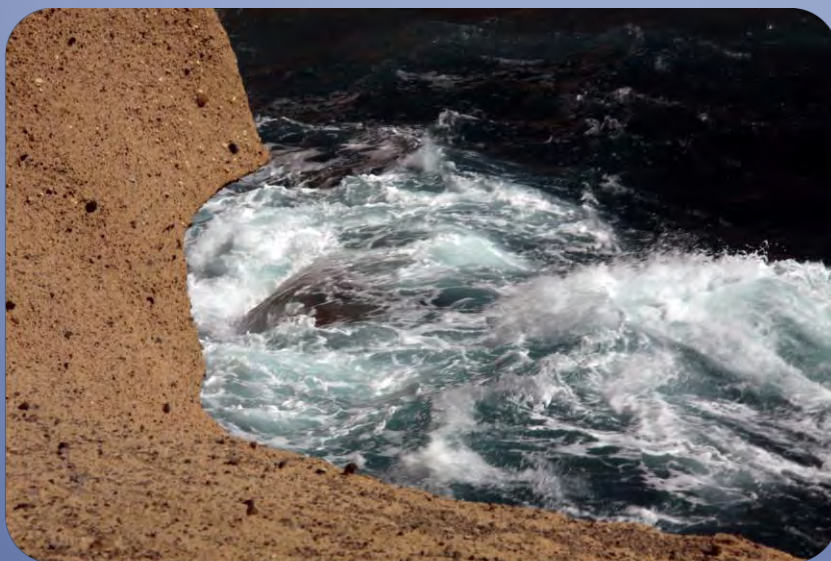
Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	215	Min	0,25
Rango	0,59	5%	0,458
Media	0,64172	10%	0,49
Varianza	0,01079	25% (Q1)	0,6
Desviación estándar	0,10386	50% (Mediana)	0,65
Coef. de variación	0,16184	75% (Q3)	0,71
Error estándar	0,00708	90%	0,78
Asimetría	-0,77761	95%	0,79
Curtosis	1,2272	Max	0,84

A-3.2.4.2 Histogramas de frecuencia:



A-3.2.4.3 Ajuste distribución de probabilidad:





Anejo 4

AJUSTE RIGUROSO DE LOS PARÁMETROS

ÍNDICE

A-4.1	INTRODUCCIÓN	1-3
A-4.1.1	Idea general del método de ajuste.....	1-3
A-4.1.2	Terminología	1-4
A-4.2	PASOS BÁSICOS	2-7
A-4.2.1	Ajuste de la presión de colapso	2-7
A-4.2.2	Rotura teórica con desviador	2-8
A-4.2.3	Errores cuadráticos de la curva de parámetros $M\beta, t, \sigma c, \lambda$	2-9
A-4.2.4	Trayectoria de ajuste.....	2-10
A-4.3	PROGRAMAS.....	3-12
A-4.3.1	Lista de programas	3-12
A-4.3.1.1	Listado.....	3-12
A-4.3.1.2	Articulación de las subrutinas	3-12
A-4.3.2	Subrutina ASIGMA.....	3-13
A-4.3.2.1	Función.....	3-13
A-4.3.2.2	Input	3-13
A-4.3.2.3	Output.....	3-13
A-4.3.2.4	Diagrama de flujo de ASIGMA	3-14
A-4.3.3	Subrutina CROTA	3-15
A-4.3.3.1	Función.....	3-15
A-4.3.3.2	Input	3-15
A-4.3.3.3	Output.....	3-15
A-4.3.3.4	Diagrama de flujo de CROTA	3-16
A-4.3.4	Subrutina CERROR.....	3-17
A-4.3.4.1	Función.....	3-17
A-4.3.4.2	Input	3-17
A-4.3.4.3	Output.....	3-17
A-4.3.4.4	Diagrama de flujo de CERROR.....	3-17
A-4.3.5	Subrutina CEPAR.....	3-18
A-4.3.5.1	Función.....	3-18
A-4.3.5.2	Input	3-18

A-4.3.5.3	Output.....	3-18
A-4.3.5.4	Diagrama de flujo de CEPAR	3-18
A-4.3.6	Subrutina DERIV	3-19
A-4.3.6.1	Función.....	3-19
A-4.3.6.2	Input	3-19
A-4.3.6.3	Output.....	3-19
A-4.3.6.4	Diagrama de flujo de DERIV	3-19
A-4.3.7	Subrutina CELANDA	3-20
A-4.3.7.1	Función.....	3-20
A-4.3.7.2	Input	3-20
A-4.3.7.3	Output.....	3-20
A-4.3.7.4	Diagrama de flujo CELANDA.....	3-21
A-4.3.8	Programa total ARPAP	3-22
A-4.3.8.1	Función.....	3-22
A-4.3.8.2	Input	3-22
A-4.3.8.3	Output.....	3-22
A-4.3.8.4	Diagrama de flujo ARPAP	3-23

A-4.1 INTRODUCCIÓN

A-4.1.1 Idea general del método de ajuste

a) Parámetros a ajustar

Se han propuesto dos tipos de familias de curvas de colapso a ajustar:

- Familia Coulombiana:

$$q = M(p + t) \left(1 - \frac{p+t}{p_c+t}\right)^\lambda \equiv Q_c(M, t, p_c, \lambda, p) \quad (\text{Ec.1})$$

con los parámetros (M, t, p_c, λ) .

- Familia Hoek-Browniana:

$$q^2 + 2q\beta = 6\beta(p + t) \left(1 - \frac{p+t}{p_c+t}\right)^\lambda \quad (\text{Ec.2a})$$

ó bien en la forma siguiente:

$$q = \beta \left\{ \left[1 + 6 \left(\frac{p+t}{\beta} \right) \left(1 - \frac{p+t}{p_c+t}\right)^\lambda \right]^{1/2} - 1 \right\} \equiv Q_M(\beta, t, p_c, \lambda, p) \quad (\text{Ec.2b})$$

con los parámetros (β, t, p_c, λ) .

Dichas ecuaciones se pueden sintetizar en una única forma: $q = Q(p)$, para las dos familias, con las únicas diferencias formales de sustituir el parámetro numérico por un parámetro dimensional β , y una expresión un poco más complicada en el caso de H&B.

b) Idea del método

Se parte de unos datos experimentales resultantes de dos tipos de ensayos: ensayos de colapso y ensayos de rotura con desviador.

Una idea nueva es aprovechar también los ensayos de rotura con desviador para extraer información para ajustar la presión de colapso.

Lo segundo es partir de unos parámetros supuestos $(M^0, t^0, p_c^0, \lambda^0)$ o bien $(\beta^0, t^0, p_c^0, \lambda^0)$ según el caso, lo suficientemente cercanos a los valores reales, para llegar a estos a través de sucesivas aproximaciones.

El criterio para juzgar sobre la mejoría de una aproximación es la evaluación del error cuadrático total del ajuste.

Las fases del método son las siguientes:

1. Se deja fijo el valor λ^0 . Se trata de obtener mediante el ajuste de los parámetros restantes el mejor valor del error cuadrático $E(\lambda^0)$.
2. Una vez determinado $E(\lambda^0)$, se modifica λ^0 en $\lambda = \lambda^0 + \Delta\lambda$ y se determina de nuevo el error cuadrático $E(\lambda^1)$, volviendo a ajustar de nuevo los restantes parámetros mediante el mismo procedimiento de la fase 1.
3. Se va variando el valor de λ , hasta llegar a obtener un $E(\lambda)$ mínimo. Se llega así a los valores finales ajustados de los parámetros.

La esencia del método radica en la manera de modificar los parámetros M , t , σ_c ó bien β , t , σ_c , para obtener el mejor $E(\lambda)$.

A-4.1.2 Terminología

a) Datos experimentales (Fig.A-4.1)

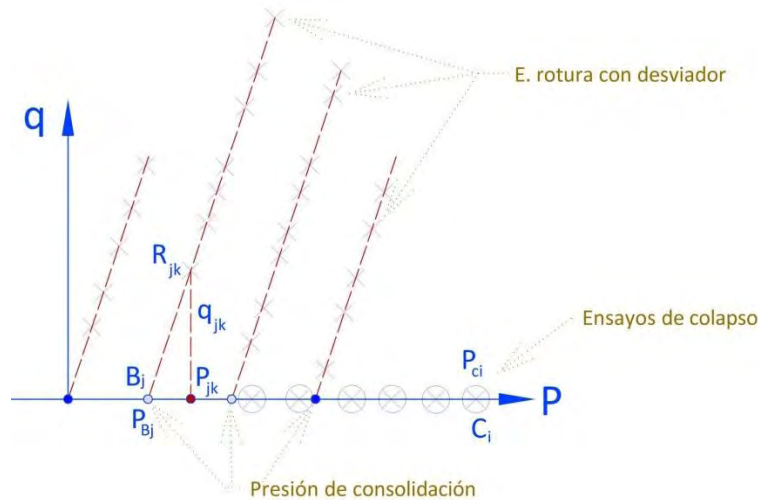


Fig.A-4.1: Datos experimentales.

1. Serie de ensayos de colapso C_i :
 - Presión de colapso del ensayo C_i : p_{ci} , con $i = 1, 2, \dots, N_c$
 - Número total de ensayos de colapso: N_c
2. Series de ensayos de rotura con desviador R_{jk} :
 - Serie con la misma presión de consolidación p_{Bj} , con $j = 1, 2, \dots, J$
 - Puntos de rotura R_{jk} con tensiones: p_{jk}, q_{jk} , $k = 1, 2, \dots, n_{jk}$
 - Número total de ensayos de la serie j : n_{jk}
 - Número total de ensayos con rotura con desviador N_D

$$N_D = \sum_{j=1}^{i=J} n_{jk}$$

b) Valores teóricos de rotura A_j (Fig. A-4.2)

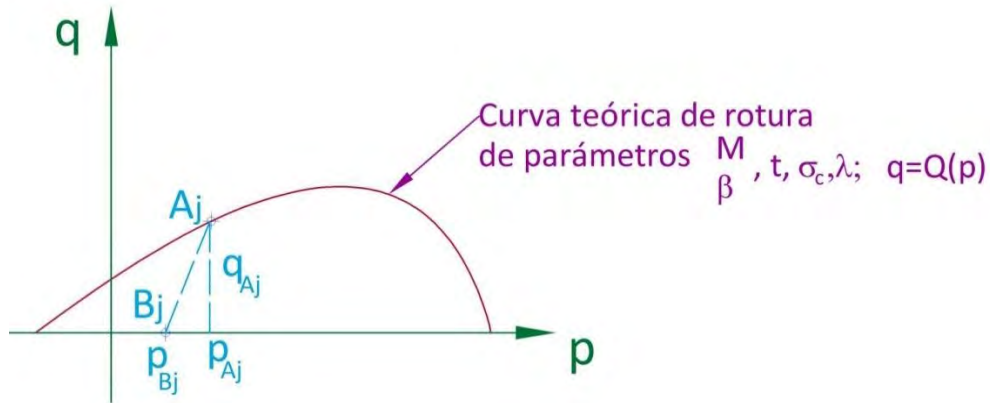


Fig. A-4.2: Curva teórica de rotura. Valores teóricos de rotura A_j .

La rotura teórica de un ensayo con presión de consolidación p_{Bj} , se produce en el punto A_j sobre la curva teórica con las tensiones q_{Aj} , p_{Aj} . Se verifican las relaciones:

$$q_{Aj} = 3(p_{Aj} - p_{Bj}) \quad (\text{Ec.3})$$

$$q_{Aj} = 3(p_{Aj} - p_{Bj}) = Q(p_{Aj})$$

c) Presión teórica de colapso correspondiente a una rotura con desviador R_{jk} (Fig. A-4.3)

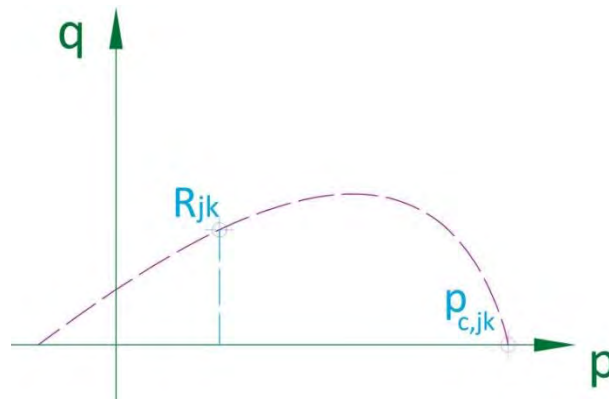


Fig. A-4.3: Presión teórica de colapso correspondiente a una rotura con desviador R_{jk} .

Presión de colapso $p_{c,jk}$. Se verifica la siguiente relación:

$$Q\left(\frac{\beta}{M}, t, p_{c,jk}, \lambda; p_{jk}\right) = q_{jk} \quad (\text{Ec.4})$$

d) Error cuadrático E_{jk} , de un ensayo con desviador

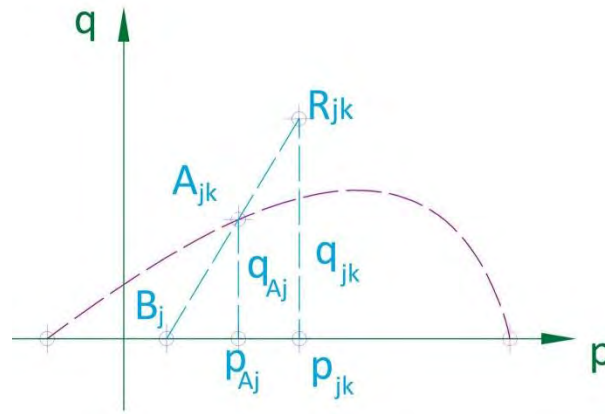


Fig. A-4.4: Parámetros del error cuadrático.

El error cuadrático E_{jk} correspondiente a un ensayo R_{jk} es (Fig. A-4.4):

$$E_{jk} = \overline{A_j R_{jk}}^2 = (p_{jk} - p_{Aj})^2 + (q_{jk} - q_{Aj})^2 \quad (\text{Ec.5})$$

e) Máxima pendiente

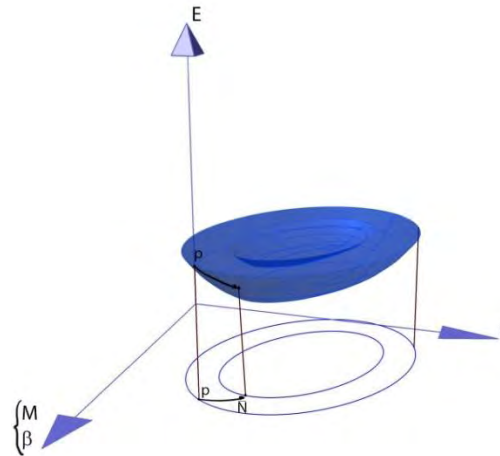


Fig. A-4.5: Componentes de la normal \bar{N} .

$$E = E\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$$

Los componentes de la normal \bar{N} (proyección de la máxima pendiente) en el sentido descendiente sobre los ejes $\frac{M}{\beta}, t$ son respectivamente (Fig. A-4.5):

$$-\frac{\partial E}{\partial \frac{M}{\beta}}, -\frac{\partial E}{\partial t}$$

A-4.2 PASOS BÁSICOS

A-4.2.1 Ajuste de la presión de colapso

a) Presión de colapso $P_{c,jk}$ compatible con un ensayo R_{jk} (Fig. A-4.6)

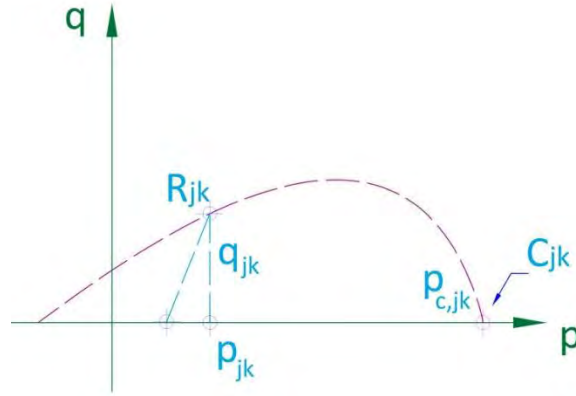


Fig. A-4.6: Presión de colapso $P_{c,jk}$ compatible con un ensayo R_{jk}

Suponiendo fijos los valores de los parámetros $\left(\frac{M}{\beta}, t, \lambda\right)$ se debe verificar:

$$q_{jk} = Q\left(\frac{M}{\beta}, t, p_{c,jk}, \lambda; p_{jk}\right)$$

Esta ecuación permite determinar el valor de la presión de colapso $p_{c,jk}$ compatible con la rotura con desviador R_{jk} .

Particularizando para el caso Coulombiano:

$$q_{jk} = M(p_{jk} + t) \left(1 - \frac{p_{jk}+t}{p_{c,jk}+t}\right)^\lambda \quad (\text{Ec.6})$$

de donde,

$$p_{c,jk} = \frac{p_{jk}+t}{1 - \left(\frac{q_{jk}}{M(p_{jk}+t)}\right)^{1/\lambda}} - t \quad (\text{Ec.7})$$

En el caso de Hoek & Brown:

$$q_{jk} = \beta \left\{ \left[1 + 6 \left(\frac{p_{jk}+t}{\beta} \right) \left(1 - \frac{p_{jk}+t}{p_{c,jk}+t} \right)^{1/\lambda} \right]^2 - 1 \right\} \quad (\text{Ec.8})$$

de donde,

$$p_{c,jk} = \frac{p_{jk+t}}{1 - \left[\left(\frac{q_{jk}}{6(p_{jk+t})} \right) \left(\frac{q_{jk}}{\beta} + 2 \right) \right]} - t \quad (\text{Ec.9})$$

b) Presión de colapso ajustada p_c^a

La presión de colapso ajustada resuelta de tener en cuenta no solo los ensayos de colapso sino también los ensayos de rotura con desviador.

No cabe duda que a los primeros debe dársele una mayor fiabilidad que a los segundos. Así pues a los primeros se les dará un peso 1 y a los segundos un peso r , $r < 1$. La presión de colapso ajustada será entonces:

$$p_c^a = \frac{\sum p_{ci} + r \sum p_{c,jk}}{N_c + r N_D} \quad (\text{Ec.10})$$

Ecuación que se puede poner en la forma:

$$p_c^a = \left(\frac{1}{1 + r \alpha_D} \right) p_{c,col} + \frac{r \alpha_D}{1 + r \alpha_D} p_{c,desv} \quad (\text{Ec.11})$$

en donde:

$$p_{c,col} = \frac{\sum p_{ci}}{N_D}, p_{c,desv} = \frac{\sum p_{c,jk}}{N_D}, \alpha_D = \frac{N_D}{N_c}, r: \text{coeficiente de confianza.}$$

A-4.2.2 Rotura teórica con desviador

a) Caso Coulombiano (Fig. A-4.7)

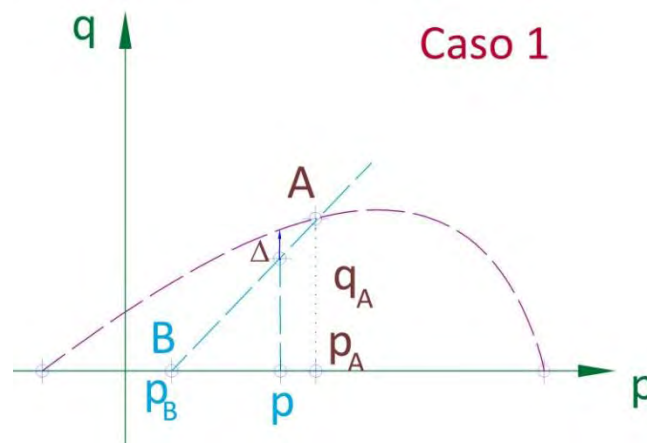


Fig. A-4.7: Caso Coulombiano.

$$\text{Ecuación curva de rotura } q = M(p + t) \left(1 - \frac{p+t}{p_c+t}\right)^\lambda = Q(p)$$

$$\text{Ecuación ensayo desviador } q = 3(p - p_B)$$

Se encuentra el punto de rotura A cuando la función $\Delta(p) = Q(p) - 3(p - p_B)$ sea nula: $\Delta(p_A) = Q(p_A) - 3(p_A - p_B) = 0$.

siendo $Q(p)$ la ecuación de la curva de rotura.

b) El mismo sistema vale para el caso de Hoek&Brown.

c) Consideraciones

El cálculo se repite para todas las presiones de consolidación p_{Bj} , con $j=1, 2, \dots, J$.

Con lo que se consigue el conjunto de presiones teóricas de rotura (p_{Aj}, q_{Aj}) , que corresponderán a una curva teórica de rotura con parámetros $\left(\frac{M}{\beta}, t, \sigma_c, \lambda\right)$.

A-4.2.3 Errores cuadráticos de la curva de parámetros $\left(\frac{M}{\beta}, t, \sigma_c, \lambda\right)$

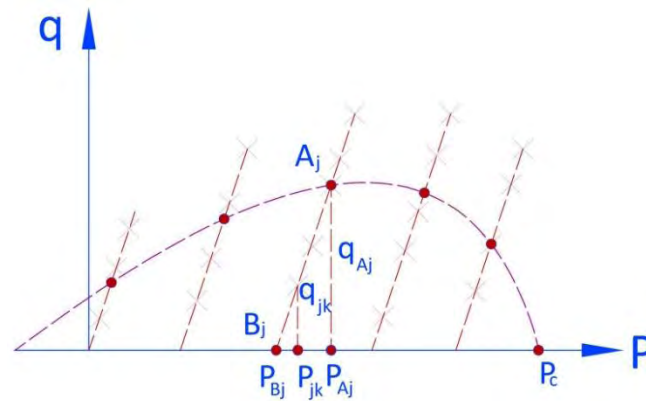


Fig. A-4.8: Parámetros para el cálculo del error cuadrático.

a) Error cuadrático de los ensayos con presión de consolidación p_{Bj} (Fig. A-4.8)

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n_{jk}} \left[(p_{jk} - p_{Aj})^2 + (q_{jk} - q_{Aj})^2 \right] \quad (\text{Ec.13})$$

b) Error cuadrático total

$$E = \sum_{j=1}^J E_j \quad (\text{Ec.14})$$

A-4.2.4 Trayectoria de ajuste (Fig. A-4.9)

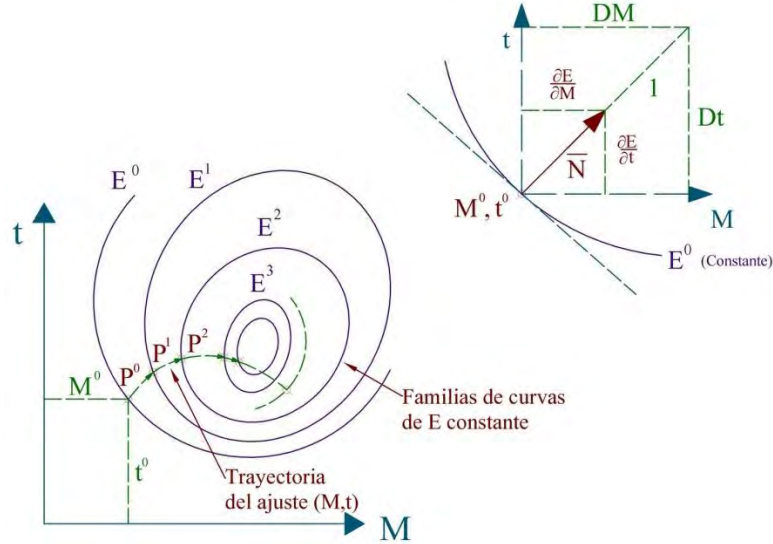


Fig. A-4.9: Trayectorias de ajuste.

a) Idea del ajuste del par $\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$

Para un valor fijo de λ , y uno conjunto de ensayos experimentales R_{jk} , el error cuadrático total E es sólo función de $\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$, ya que σ_c , es en esas condiciones una función de $\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$. (Véase 2.1).

La trayectoria ideal del ajuste del par $\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$ a partir de un punto $\left(\frac{M^0}{\beta^0}, t^0\right)$ es seguir la línea ortogonal a la familia de valores constantes de E .

Así pues dado un valor del par $\left(\frac{M^0}{\beta^0}, t^0\right)$, se debe dar conjuntamente un par $\left(\frac{dM^0}{d\beta^0}, dt^0\right)$, según la normal a la curva $E^0 = \text{constante}$, en el sentido de la E decreciente.

b) Incremento optimo del par $\left(\frac{M}{\beta}, t\right)$

Los componentes de la normal a E constante son:

$$N_M = \frac{\partial E}{\partial M}, N_t = \frac{\partial E}{\partial t}$$

El módulo de la normal es:

$$Mod = \sqrt{N_M^2 + N_t^2}$$

Con lo que la normal unitaria tiene por componentes:

$$DM = \frac{N_M}{Mod}, \quad Dt = \frac{N_t}{Mod}$$

El incremento optimo del par a ajustar (M, t) es:

$$\Delta M = -DM(du), \quad \Delta t = -Dt(du)$$

Siendo du un valor arbitrario tal que $\frac{du}{M^0}$ y $\frac{du}{t^0} \leq \iota \approx 0.05$

c) Fin de la trayectoria

Se pasa de un punto $p^0 \equiv (M^0, t^0)$ a un punto $p^1 \equiv (M^1, t^1)$ con los errores cuadráticos E^0 y E^1 , y los componentes de las normales unitarias DM^0 , Dt^0 y DM^1 , Dt^1 respectivamente.

1. Si se verifica que $E^0 < E^1$. Se para la trayectoria y se toma como valores finales del ajuste M^0 , t^0 , E^0 .
2. Si se verifica $E^0 > E^1$. Pueden darse dos casos:
 - a. Caso 1: el producto escalar $DM^0 DM^1 + Dt^0 Dt^1 > 0$, entonces se continua la trayectoria.
 - b. Caso 2: el producto escalar $DM^0 DM^1 + Dt^0 Dt^1 < 0$, en este caso se para la trayectoria y se obtiene el valor final para M^1 , t^1 , E^1 .

d) Detalle inicial

Después del punto inicial p^0 , se incrementa siempre para pasar al punto p' .

A-4.3 PROGRAMAS

A-4.3.1 Lista de programas

A-4.3.1.1 Listado

Por orden de complejidad distinguiremos:

1. Subrutinas básicas:

ASIGMA

CROTA

CERROR

2. Subrutinas complejas:

CEPAR

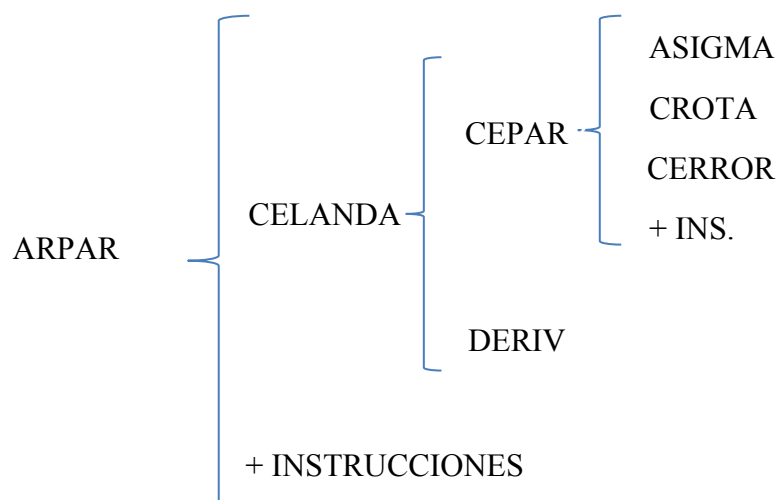
DERIV

CELANDA

3. Programa complejo:

ARPAR

A-4.3.1.2 Articulación de las subrutinas



A-4.3.2 Subrutina ASIGMA

A-4.3.2.1 Función

Obtiene la presión de colapso ajustada p_c^a , suponiendo conocidos los parámetros de la curva de rotura, teniendo en cuenta la presión media de colapso p_c (obtenida como media de los resultados de los ensayos de colapso isótropo), y los resultados q_{jk}, p_{jk} de los ensayos de rotura con desviador y presión de consolidación p_{Bj} .

A-4.3.2.2 Input

Se entra con:

- p_c , presión media de colapso isótropo.
- q_{jk}, p_{jk} , resultados de rotura con desviador.
- n_{jk} , número de ensayos de rotura con presión de consolidación p_{Bj} .
- n_c y n_D , número de ensayos isótropos y ensayos con desviador respectivamente.
- n_j , número de presiones de consolidación.
- $\alpha_D = \frac{N_D}{N_C}$
- r , coeficiente de confianza de los ensayos con desviador.

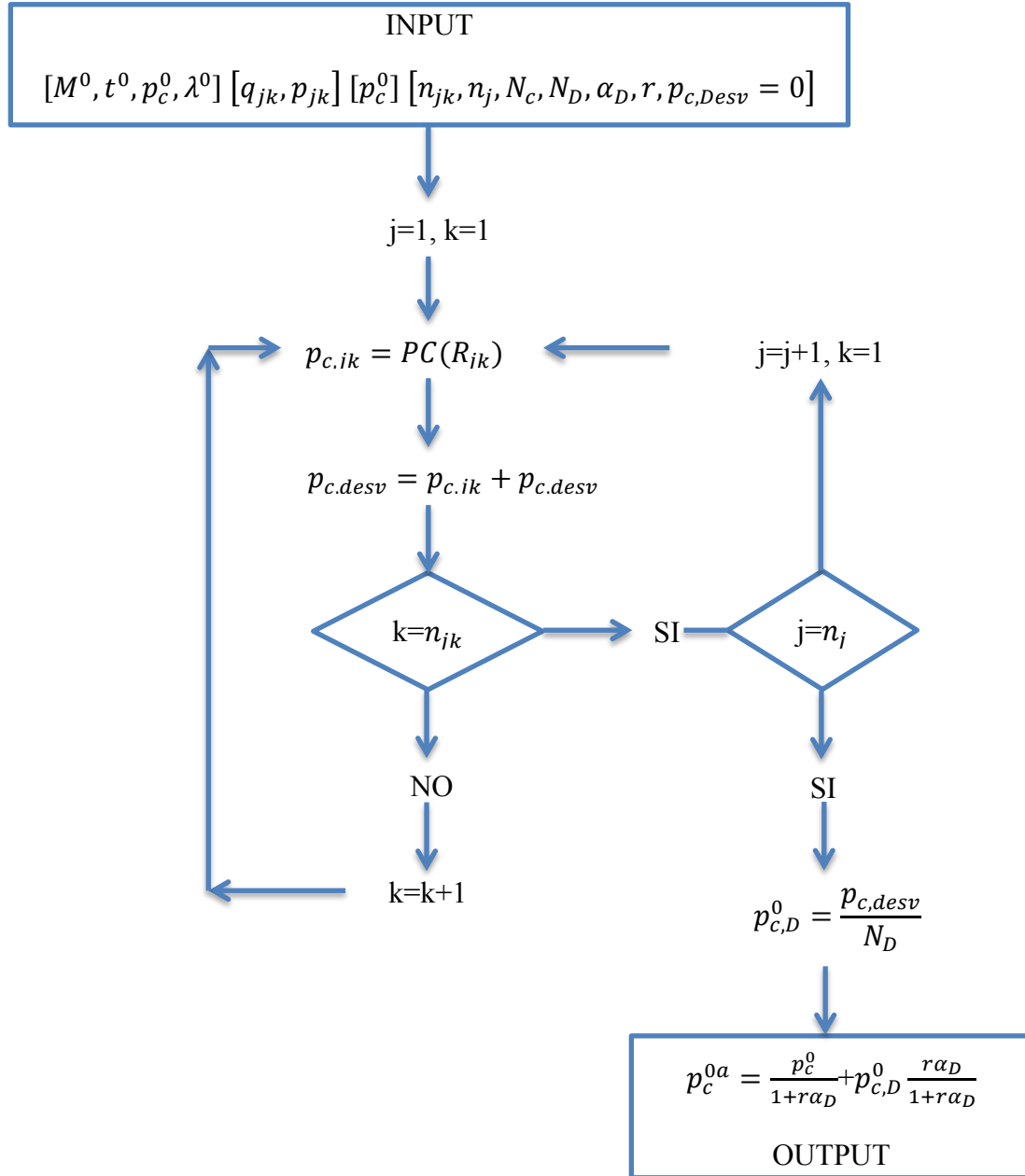
Los parámetros de la curva son: $[M^0, t^0, p_c^0, \lambda^0]$ o bien $[\beta^0, t^0, p_c^0, \lambda^0]$.

A-4.3.2.3 Output

p_c^{0a} : presión de colapso ajustada con los ensayos con desviador.

NOTA: prepararemos los diagramas de flujo para el caso M-C. El caso H-B es similar.

A-4.3.2.4 Diagrama de flujo de ASIGMA



$$PC(R_{jk}) \equiv \frac{p_{jk} + t^0}{1 - \left[\frac{q_{jk}}{M^0(p_{jk} + t^0)} \right]^{1/\lambda^0}} - t^0$$

A-4.3.3 Subrutina CROTA

A-4.3.3.1 Función

Obtiene el punto A_j de rotura teórica, sobre la curva de rotura de parámetros conocidos, para los ensayos con presión de consolidación p_{Bj} .

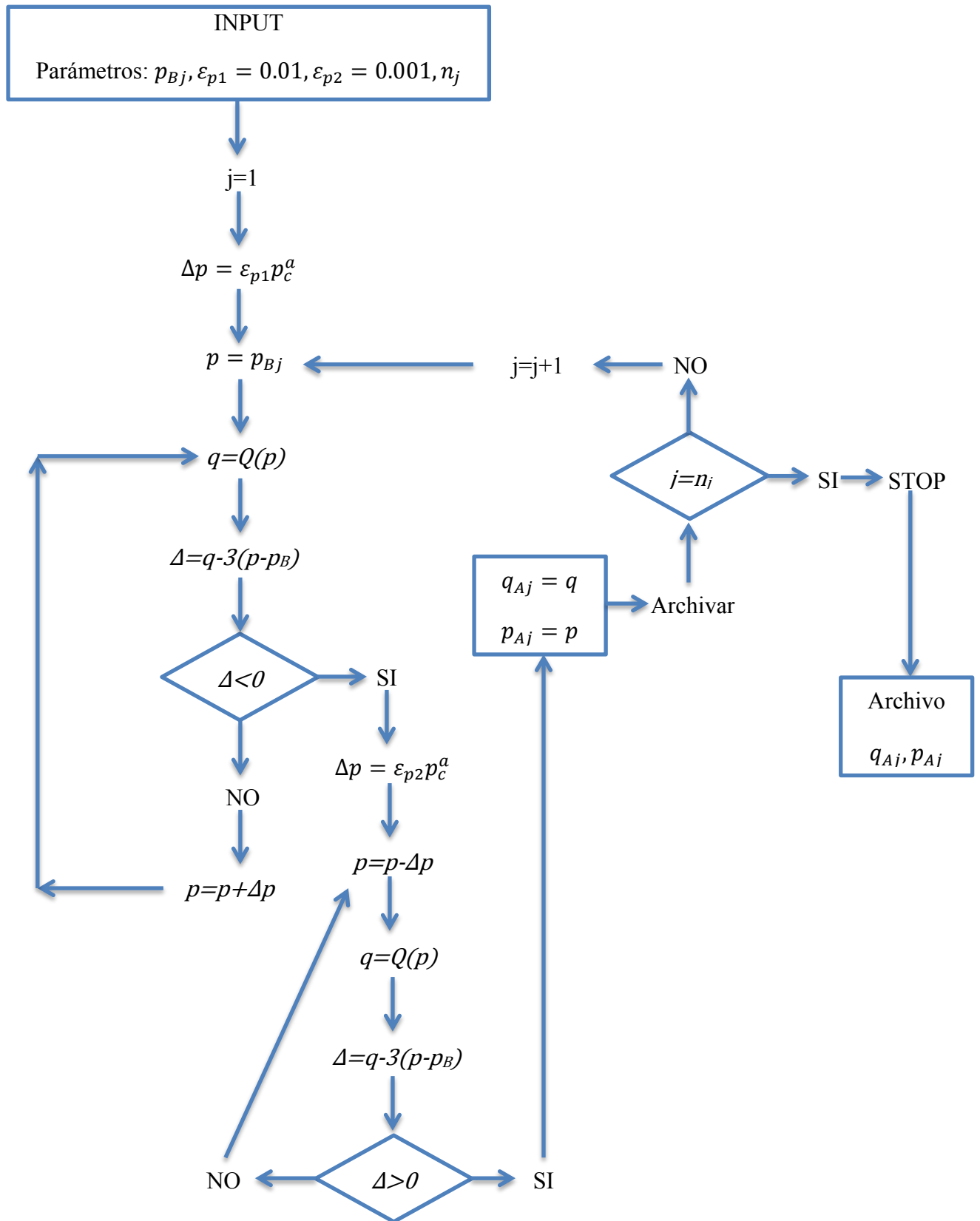
A-4.3.3.2 Input

Se entra con los n_j , presiones de consolidaciones p_{Bj} y los parámetros de la curva, y los coeficientes de aproximación ε_p y ε_D .

A-4.3.3.3 Output

Un archivo con los puntos de rotura $A_j(q_{Aj}, p_{Aj})$ correspondiente a cada desviador p_{Bj} .

A-4.3.3.4 Diagrama de flujo de CROTA



A-4.3.4 Subrutina CERROR

A-4.3.4.1 Función

Obtiene el error cuadrático E de una curva de rotura de parámetros dados, relativo a unos ensayos de rotura con desviador $R_{jk}(q_{jk}, p_{jk})$.

A-4.3.4.2 Input

Puntos de rotura experimentales $R_{jk}(q_{jk}, p_{jk})$.

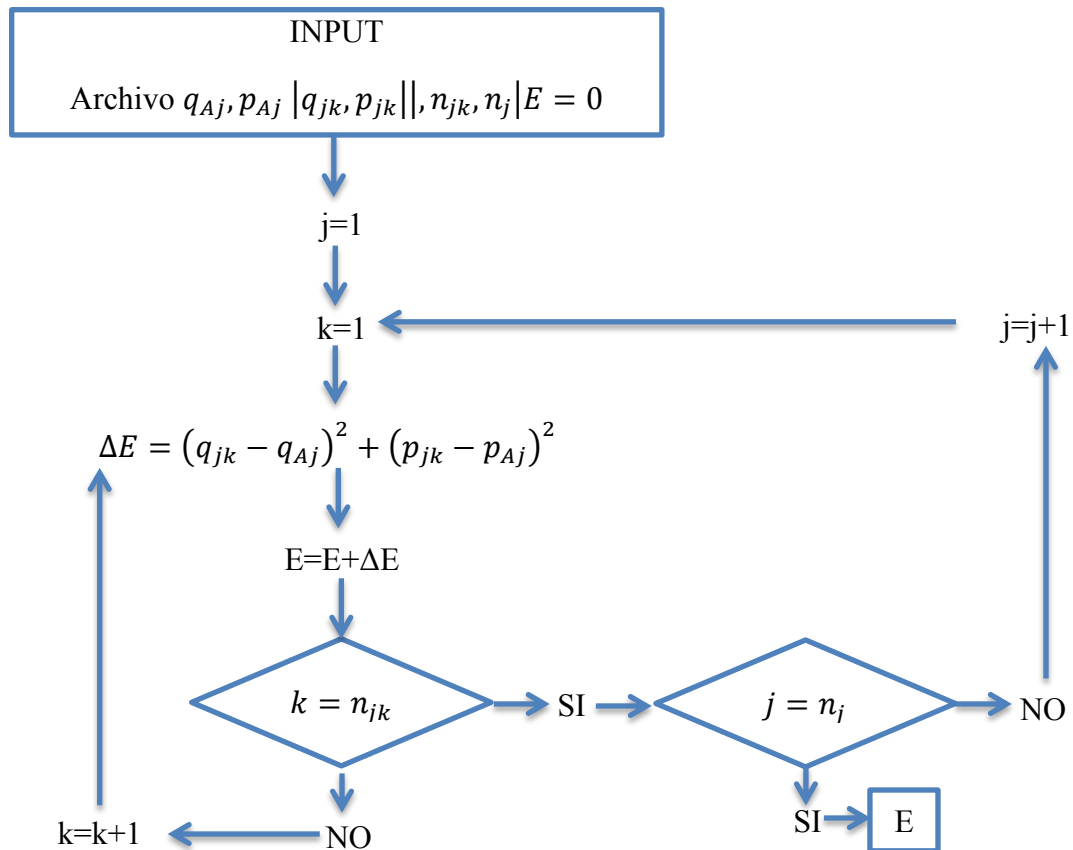
- Archivos de puntos de teóricos de rotura (q_{Aj}, p_{Aj}) correspondientes a las presiones de consolidación p_{Bj} .
- n_{jk} y n_j , números de ensayos de desviador correspondientes a cada presión de consolidación p_{Bj} , y números de presiones de consolidación respectivamente.
- Error cuadrático inicial $E=0$.

A-4.3.4.3 Output

Error cuadrático de la curva de parámetros dada E:

$$E = E(M^0, t^0, p_c^{0a}, \lambda^0)$$

A-4.3.4.4 Diagrama de flujo de CERROR



A-4.3.5 Subrutina CEPAR

A-4.3.5.1 Función

Subrutina compuesta de las anteriores subrutinas básicas, que obtiene el error cuadrático, a una curva de rotura de parámetros dados y con la presión de consolidación ajustada incluyendo la influencia de los ensayos con desviador.

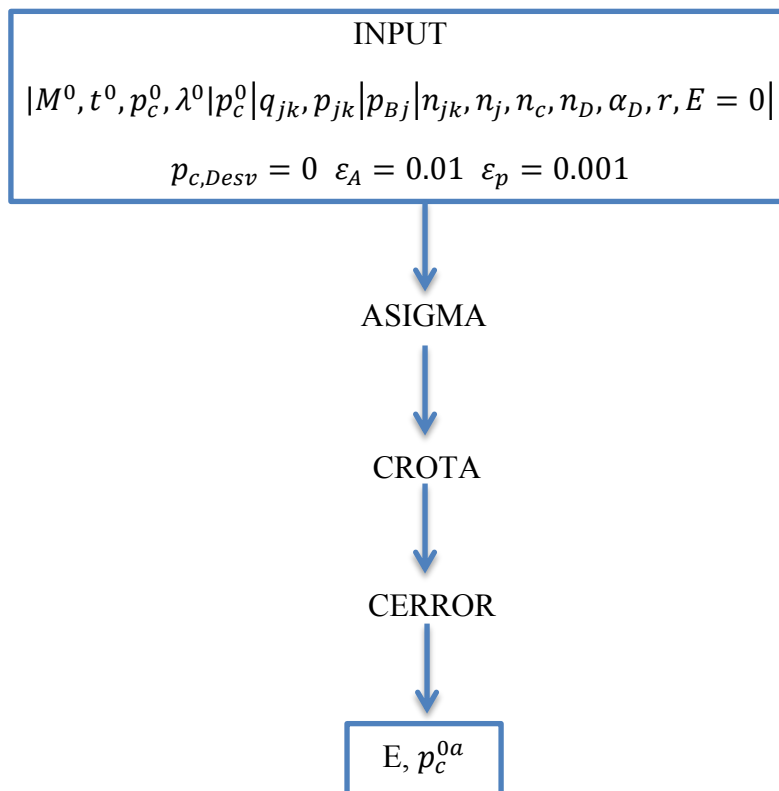
A-4.3.5.2 Input

Los correspondientes a las subrutinas ASIGMA, SROTA y CERROR.

A-4.3.5.3 Output

El error cuadrático E.

A-4.3.5.4 Diagrama de flujo de CEPAR



A-4.3.6 Subrutina DERIV

A-4.3.6.1 Función

Obtiene la normal unitaria en el punto (M^0, t^0) , a la familia de curvas con E constante, para un cierto λ^0 fijo:

$$E(M^0, t^0, p_c^{0a}, \lambda^0) = E_{\text{constante}}$$

Como se ha visto, p_c^{0a} es función de M^0 y t^0 .

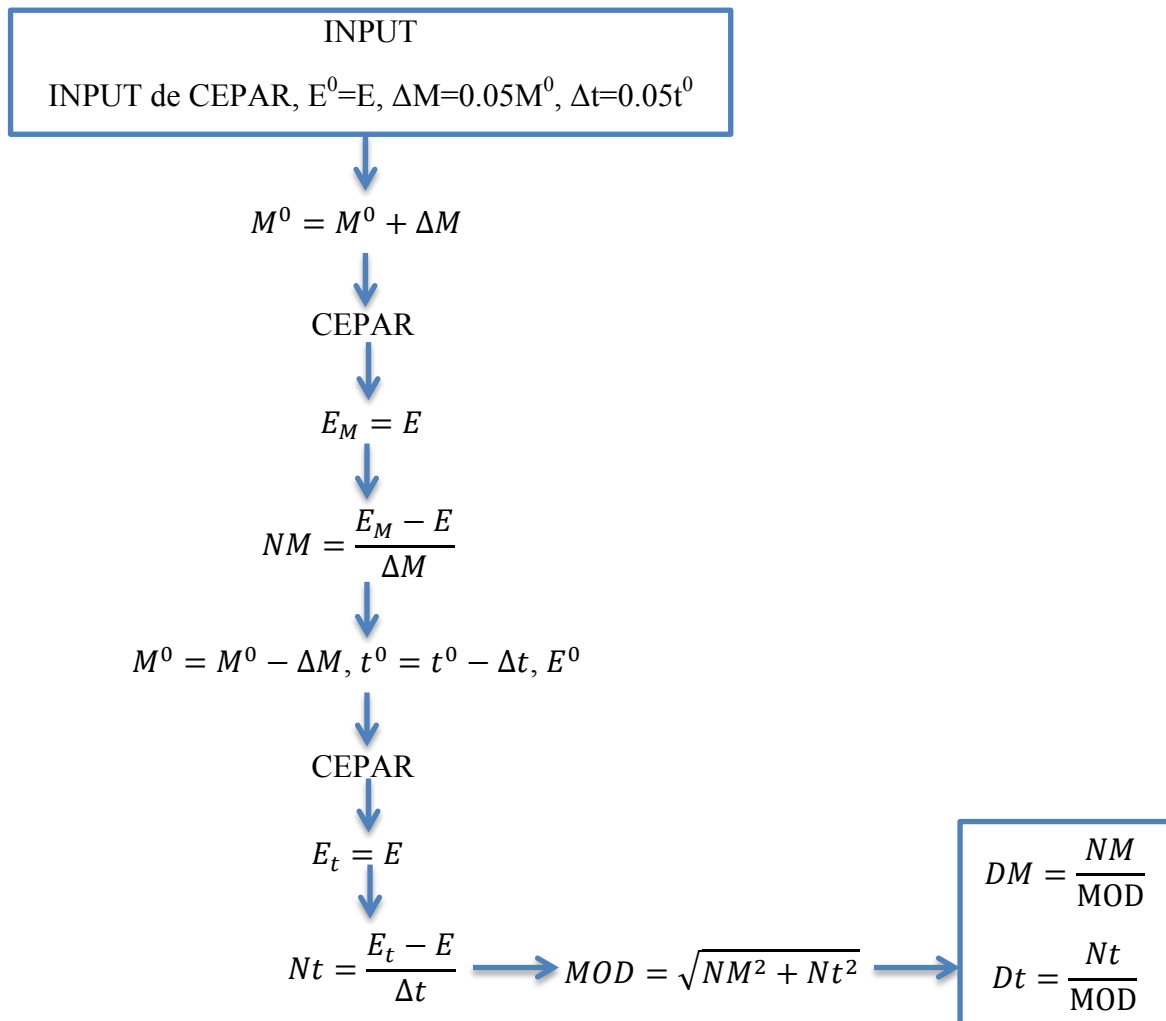
A-4.3.6.2 Input

El necesario para CEPAR

A-4.3.6.3 Output

Las componentes de la normal unitaria DM y Dt en los ejes M, t, a la curva E constante.

A-4.3.6.4 Diagrama de flujo de DERIV



A-4.3.7 Subrutina CELANDA

A-4.3.7.1 Función

Dado un λ^0 , va modificando los parámetros M^0 , t^0 , hasta encontrar un error cuadrático mínimo.

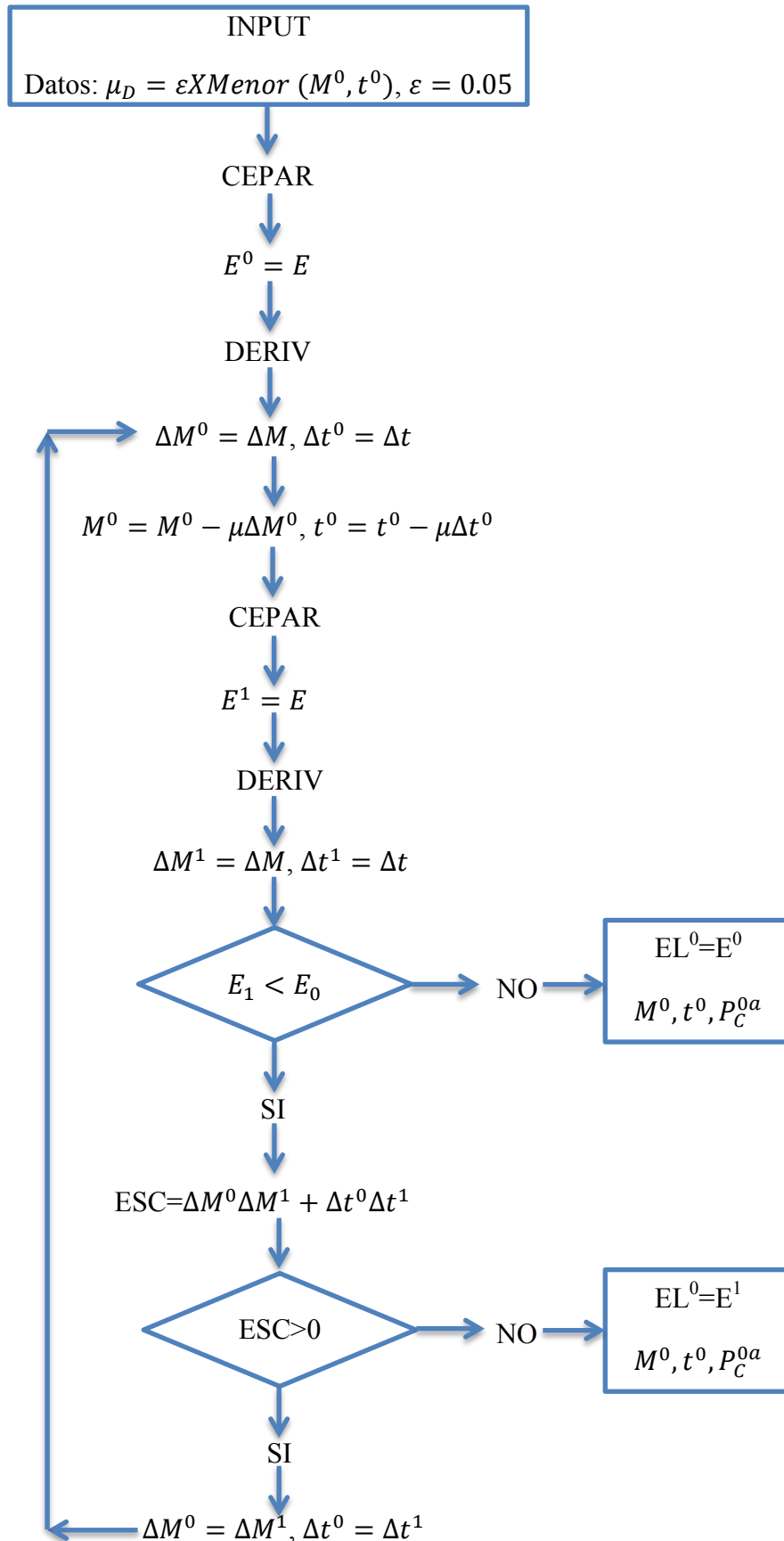
A-4.3.7.2 Input

El correspondiente a CEPAR, ε .

A-4.3.7.3 Output

Los parámetros M^0 , t^0 , p_c^{0a} , y el error cuadrático mínimo EL^0 , correspondiente con un λ^0 .

A-4.3.7.4 Diagrama de flujo CELANDA



A-4.3.8 Programa total ARPAR

A-4.3.8.1 Función

Da los parámetros óptimos λ , M , t , p_c^a , junto con el error cuadrático mínimo EL .

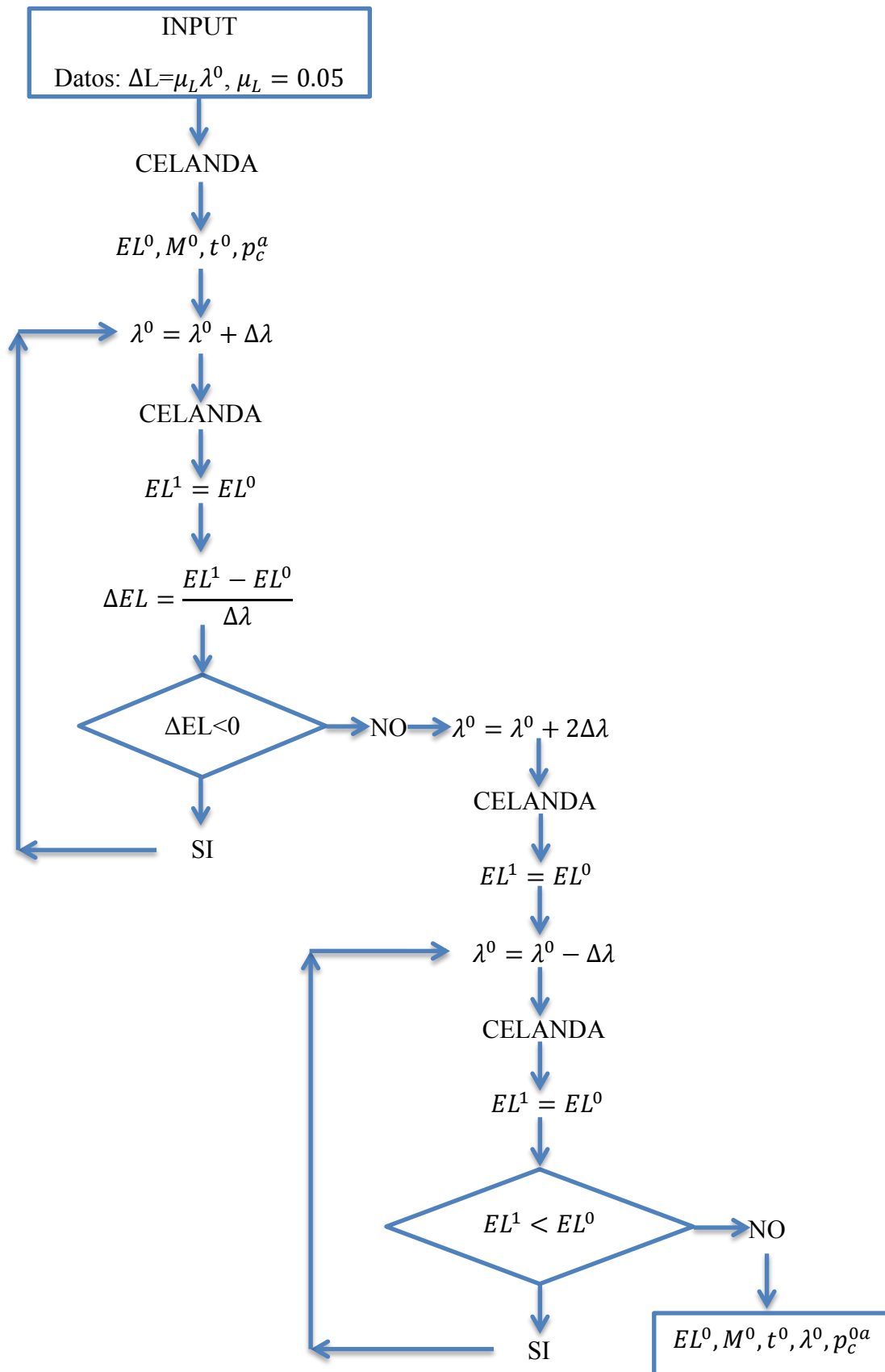
A-4.3.8.2 Input

Todos los correspondientes a CELANDA.

A-4.3.8.3 Output

λ , M , t , p_c^a y EL .

A-4.3.8.4 Diagrama de flujo ARPAP



**ABSTRACT:
GEOTECHNICAL
CHARACTERIZATION OF
LOW DENSITY VOLCANIC
MATERIALS**

INTRODUCTION AND OBJECTIVES

The volcanic materials of the Canary Islands have some geotechnical particularities. In general, they have distinctive and little known non-linear strength and deformability characteristics, which requires the need to carry out rather sophisticated tests and interpret them in light of new theories, different from the ones used in other types of soils and rocks. This is particularly relevant in low-density pyroclastic material whose geotechnical quality is usually mediocre, as they are halfway between "hard soils" and "soft rocks".

As a result, these materials pose specific problems regarding potential sudden collapse or failure, which occur suddenly, without significant prior deformations that may serve as a warning. Additional problems include the estimation of the thrust exerted on walls, the allowable loads on foundations of structures built on them and on the stability of slopes formed on the same, which has a significant impact in the field of civil engineering and edification in the Canary Islands. Therefore there is a great interest to have a theoretical and practical framework to describe and to estimate the strength and deformability properties of the Canarian pyroclastics.

Although previous studies have led to advances in the understanding of the geotechnical behavior of these materials, there are still many aspects and geotechnical characteristics in which to have a better understanding.

The main objective of the thesis is to advance the understanding of stress-strain behavior of low density pyroclasts, determining the most influential factors in it, such as its structure or alteration. Particular attention has been paid to examine aspects considered paramount such as: macroporosity (size and morphology of the pores, their relative size in relation to the particles,...), alteration of the said particles or partially or completely filling the macropores in materials altered by deposits of crystals or particles due to the circulation of fluids.

More specifically, the proposed study is intended to obtain:

1. A failure criterion of these materials, based on a few parameters, that allows estimating the maximum stresses applied to them.
2. A geotechnical classification of the main types of low density pyroclasts, that allows to define a type of behavior and values or ranges of typical values of these parameters for each defined group.
3. More test data of low density volcanic materials, in order to improve the different correlations obtained in previous studies and try to get others equally important in civil works.

CONTENT OF THE RESEARCH

The following will summarize the work carried out during this investigation:

1. Geology of Volcanic Areas:

First a summary was made on volcanic environments, classifications most used for volcanic rocks, different products of a volcanic eruption, etc., in order to give an overview of the geology which includes the materials investigated in this thesis.

2. Literature Review on the Mechanical Behavior of Soft Pyroclastic Rocks:

A literature review was done on the current state of knowledge about the mechanical behavior of low density pyroclasts. Although referred to as pyroclastic flows and surges, which are materials with different genesis than those studied in this thesis, their structure is similar to that of pyroclastic fall and stress-strain behavior is also similar except that on a different scale. Therefore, the study their behavior has helped advance the study of pyroclastic fall. In this review, we extracted test data of different pyroclastic flows analyzed in the memoir.

Most authors reach the conclusion of the great influence the structure of these materials have in their resistance.

The dispersion of data in both isotropic and in triaxial compression can be attributed in part to the different values of initial porosity and partly to different degrees of welding and other structural features.

Several authors, such as: Aversa (1998), Serrano (1976, 1997) and Adachi (1981) have developed different yield surfaces for pyroclastic flow, pyroclastic falls and pyroclastic surges, respectively.

3. Proposed Models

A number of behavioral models for these materials have been proposed, based on different principles. The proposed models are:

- First a theoretical behavioral model is proposed based on the energy consumption of these materials during failure, similar to previous proposals made by Serrano (1976, 1997) and Serrano et al (2002b). The proposed model is a step forward in the thermodynamics of failure compared with previous models of Serrano.
- Second, models or unified failure criteria are proposed, that somehow represent a generalized extension of the failure models according Coulomb (Parabolic criterion) and Hoek and Brown (Elliptic criterion).
- Finally, a model fit for obtaining the isotropic collapse pressure as a function of dry density of these materials is proposed. The model was first derived theoretically, considering the macrostructure of the material's pores, and then is adjusted to the empirical results to obtain the parameters' fit involved therein.

Thereafter, the study of the empirical behavioral fit of the materials to the proposed models is conducted and from it follows which model of behavior best fits the available empirical data.

4. Search for the "Ideal pyroclast":

Previous results obtained in different studies in the Geotechnical Laboratory of CEDEX (Serrano et al, 2007), showed a significant dispersion, and also required the realization of a greater number of tests to refine the different correlations obtained. It was determined that there was a need to search for an "artificial" pyroclast, manufactured in the laboratory, whose geotechnical behavior could be similar to real pyroclasts, and with which to build a higher quality and homogeneity battery of samples to be placed under different load conditions, whose results could have a lower dispersion and facilitate the search for strength laws.

The first requirement undertaken was to search for the appropriate binder, by performing simple compression tests in samples with different mixtures of materials (containing cement, plaster, and cement and bentonite mixtures) until defining a not very resistant material that could be subsequently mixed with the other so that it could give a similar strength and deformability as the actual pyroclasts. Once defined the binder (cement and bentonite), the next step was to create the ideal pyroclast. To this end numerous test samples with different amounts of arlite and porexpan in addition to the conglomerate were made. When a material similar to the actual pyroclasts was obtained further testing was conducted in samples with similar manufacturing process to make them as homogenous as possible. These tests were conducted prior to the real samples, which were tested later, and were very useful for tuning up both testing techniques and fitting models.

5. Geotechnical characterization of pyroclastic fall:

For this study many data were collected; including data obtained in 2007 (Serrano et al., 2007) and in 1976 (Uriel et al.1976, Serrano, 1976) and new data test, consisting of 24 samples in blocks brought from different parts of the Canary Islands, from which over 250 samples were analyzed.

Parallel results were collected in different studies conducted in several countries on pyroclastic rocks, cited and described in the memoir, Chapter 3: State of the Art.

The fit of the proposed models for all test results carried out during this research, in artificial and real samples, as well as in other mentioned works, were studied.

From the results of tests conducted on new samples of pyroclasts the different correlations obtained in year 2007 could be improved, and others were obtained of equal importance in civil works. In the next section the most relevant are attached.

CONCLUSIONS

From this study it can be drawn, grouped in relation to different aspects, the following major findings:

1. Porosity of the Material.

- Regarding the macroporosity of these materials it was confirmed the existence of different types of porosity, as defined before (CEDEX, 2007, Santana et al, 2008) and described in Chapter 3 (Spanish Group, 2007). Types of porosity are: porosity "reticular", "vacuolar", "mixed" and porosity "matrix" or "no-macropores".

From the study carried out it was concluded that:

- The lapillis have a porosity of "mixed" type, characterized by interparticle porosity "reticular" and intraparticle porosity "vacuolar".
- The pumice exhibit a porosity which may be defined as "reticular", although at the intraparticle level they also show a porosity of "vacuolar" type, it is microscopic, and therefore not relevant to the behavior of these materials.

-The structure of these materials and, therefore, their macroporosity greatly influences its geotechnical behavior.

2. Mechanical Properties.

-The values obtained from resistance to uniaxial compression strength, modulus of deformation and compressibility, isotropic collapse pressure and triaxial compression strength for different situations of confinement, for the materials studied in this work, can be seen in Figs. 1, 2 and 3. These values have helped to define normal resistance ranges for the different resistance materials included in the proposed classification.

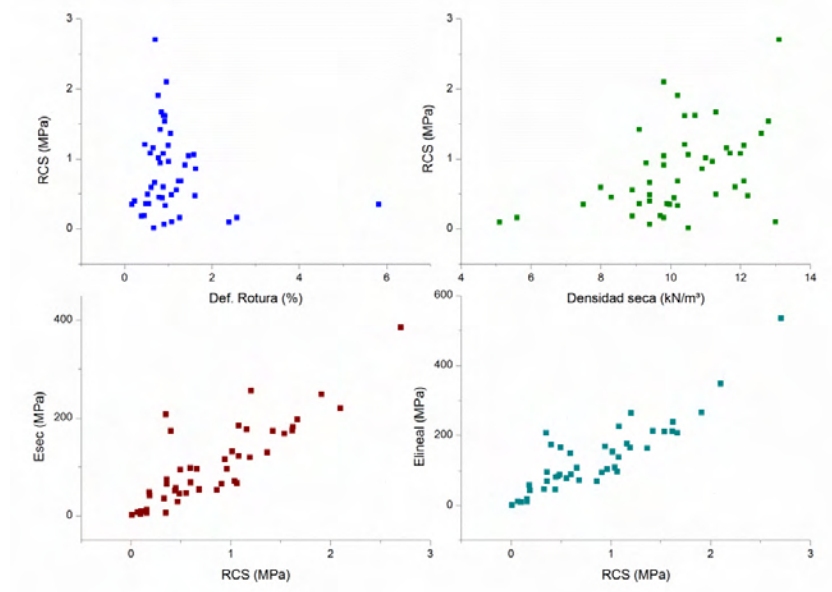


Figure.1: Summary of uniaxial compression test in the new samples. This figure shows the dry density and different modules deformability (E_{Sec} : Young's modulus secant to uniaxial compression strength, E_{lineal} : slope of the straight portion of the curve).

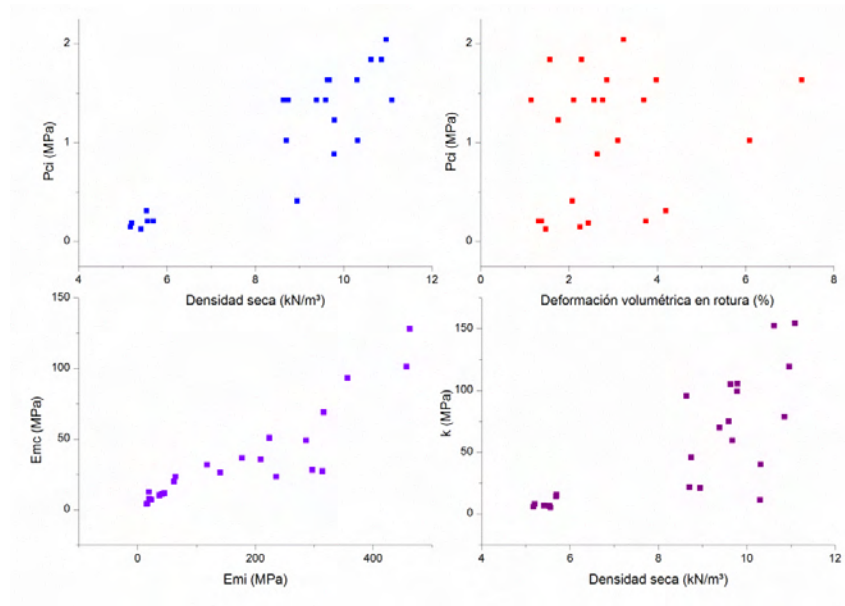


Figure.2: Test results of isotropic compression test CI.

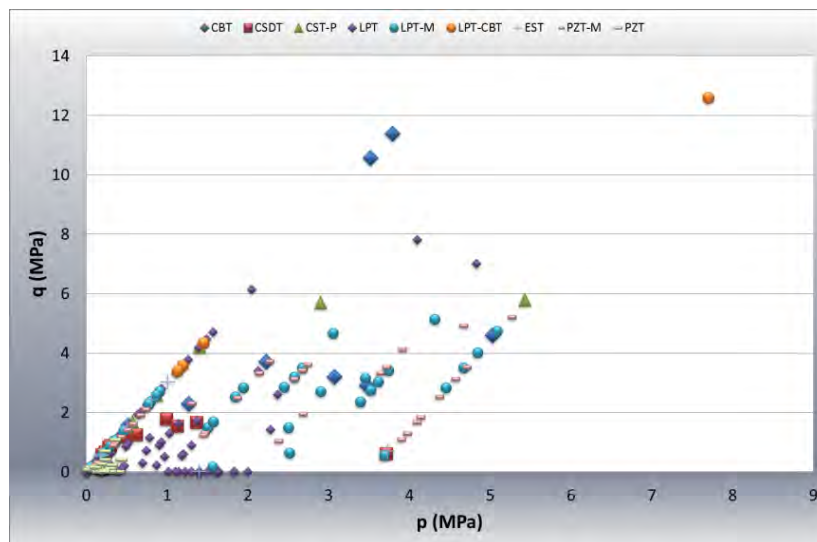


Figure.3: Test results of TIS, CI and UCS carried out in this research. Cambridge parameters.

The results of Fig.3 were separated by number of samples and type of materials to carry out the fit of the collapse curve, as shown in Fig.4.

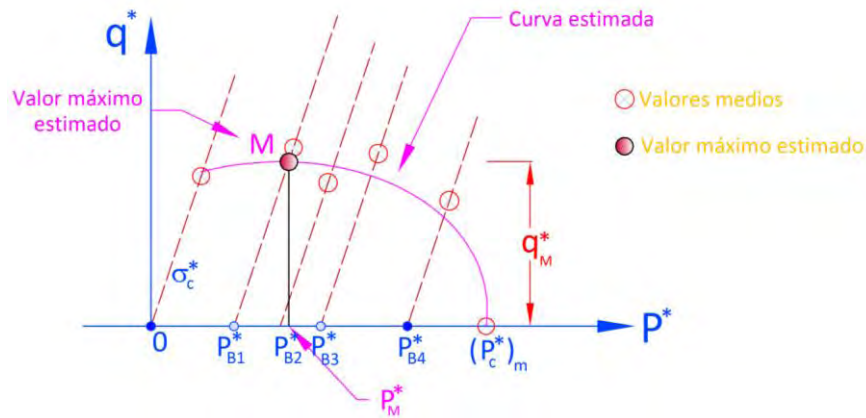


Figure. 4: Preparation of the data.

The low-density pyroclasts, whether pyroclastic flow, surge or pyroclastic fall, have a similar structure and a stress-strain behavior formally similar but with different scale.

-In relation to the strength it was seen that in isotropic compression tests, those samples with less resistant particles (pumice) present a less abrupt collapse, more gradual than the more resistant (welded lapillis), in which an abrupt collapse occurs.

-Moreover, it has been found that when pyroclastic materials are altered, i.e. with matrix around the particles filling in different percentages of the voids of the reticular porosity, these materials do not collapse at low confinement pressures (<3.5 MPa). It is believed that this is because this matrix helps these materials behave plastically under triaxial tests, and this is reflected in their form of failure, since they break in horizontal planes.

-From the results obtained in simple compression tests as well as in Triaxial (TIS and Isotropic compression) it is concluded that in the failure by uniaxial compression the predominant effect (and virtually the only one) is the failure of contacts between particles. Furthermore, in the isotropic compression failure, even though the failure of the contact between particles also occurs, the predominant effect is, however, the failure of the particles themselves; this has been substantiated by observing the samples after failure. Between both ends, in the triaxial tests (TIS) it seems that failure is caused by a combination of both phenomena, predominating one or the other depending on the low (mainly contact failure) or high (mainly particle failure) confining pressure and possibly also according to the relationship between the welding and the particle strengths, which perhaps could be quantified by the relationship between the uniaxial and isotropic compression strength of the material.

4. Shape of failure.

-The expected shapes of failure of these materials were deducted theoretically, depending on the applied load values.

-It has been found experimentally that these shapes of failure are produced by the following load forms:

- In simple compression: failure planes vertical or near-vertical.

- In triaxial compression: failure planes forming an angle of $45+v/2$ with the vertical, being the angle v the dilatancy of the material.
- With high values of confining pressure, the theory of plasticity doesn't apply (It has been shown theoretically) and a complete disintegration of the sample at failure occurs.
- In the border region of high pressure confinement where the theory of plasticity is about to fail, horizontal or quasi-horizontal failure planes appear, as it has also been theoretically demonstrated.

4. *Artificial Materials or "Ideal pyroclast"*

-It was attempted to create an artificial material or "Ideal pyroclast" that could have a more homogeneous behavior than the real materials and be used to confirm their theoretical behavior. It was decided to reproduce artificial materials with two types of porosity, "reticular" and "vacuolar".









-Even with the artificial materials and despite extensive testing and a rigorous manufacturing method the spread of results could not be prevented. However, materials that have performed best and with which it has been possible to adjust the test methods and proposed unified failure criteria (elliptical and parabolic) are the following:

- With reticular porosity: samples consist of cement, bentonite, arlite and porexpan.
- With vacuolar porosity: samples consist of cement, bentonite and porexpan.

5. *Classification of Materials.*

-In view of this study it was considered appropriate to propose a new classification of these materials, based on the prior classification of "*Consejería de obras públicas, transporte y política territorial del Gobierno de Canarias (2011)*", expanding the number of lithotypes and defining a range of expected values from relevant parameters from the geotechnical viewpoint, which are considered to be of important practical value. This classification is set as follows:

PROPOSED CLASSIFICATION OF PYROCLASTIC FALLS

LITHOTYPES (Particle size)				Welding Grade	γ_d (kN/m ³)	UCS (MPa)	P_{CI} (MPa)
Pyroclastic deposits	Basaltic pyroclast	Lapilli (LP) (2-64mm)		LPT	8-18	0.3-8	>1
				LPDT	5-10.5	<0.3	0.2-2
				LPS	-	-	-
		Scoria (ES) (>64mm)		EST	9-13	1-4	>1.5
				ESDT	7-9	<1	<1.5
				ESS	-	-	-
		Basaltic Ash (CB) (<2mm)		CBT	15-23	1-11	-
				CBDT	10-15	<1	>5*
				CBS	-	-	-
	Salic pyroclast	Pumice (PZ) (2-64mm)		PZT	5-7	0.1-1	0.1-0.5
				PZDT	<5	<0.1	<0.1
				PZS	-	-	-
		Salic Ash (CS) (<2mm)		CST	>9.5	>1	-
				CSDT	<9.5	<1	>4*
				CSS	-	-	-
Altered pyroclastic deposits	Basaltic pyroclast	LPT-M		-	9-18	0.1-3	7.5-12.5*
		CBT-P		-	-	-	-
	Salic pyroclast	PZT-M		-	8-13	0.2-2.5	3.3-7.5*
		CST-P		-	10-17	0.6-4.5	>8*

* Isotropic collapse pressure obtained by fitting.

** In gray are those materials which have not been tested due to lack of samples.

6. Failure Criteria.

-Regarding the proposed unified failure criteria, a good fit to the parabolic model has been obtained in all cases with both results, artificial and real materials. The elliptical model has been a good fit for the artificial samples. However, the outcome with real samples has been uneven, giving a good fit for some samples but not conforming to others.

-As for the adjustment of theoretical energy models, the additive model fits quite well for some samples, although there have been other samples in which the adjustment has not been so good. In turn, the multiplicative model did not fit well.

-Therefore, several models have been proposed for obtaining a failure criterion which could be valid for practical application. Among all of them was chosen the Parabolic unified model, derived from Mohr-Coulomb model, being the simplest of all, which facilitates obtaining its parameters, and fits well on all tested samples. The equation is:

$$q = M(p^* + t) \left(1 - \frac{p^* + t}{p_{co}} \right)^\lambda$$

Where:

$$-M = \frac{6 \sin \rho_0}{3 - \sin \rho_0}$$

$$-p_{co} = p_c^* + t$$

-t= tensile strength

- p_c^* = Isotropic collapse pressure

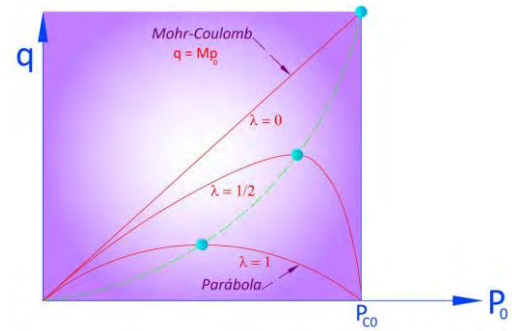


Fig. 5: Families of curves for the case Parabolic failure.

-From these adjustments values of different strength parameters are recommended, which are of practical use in projects carried out in volcanic areas where the necessary tests to obtain these values in the laboratory for a particular study is not possible. These values are shown in the table below:

Table 1: Recommended values for the model parameters for each type of material

MATERIAL (density, kN/m ³)	M	$\zeta = t/p_{co}$ (%)	λ
LPT (8-18)	2.4	9	1
LPDT (5-10.5)	2.4	5	0.7
PZT (5-7)	2	18	0.8
EST (9-13)	3	1.6	0.22
LPT-M (9-18)	1.4	3	1
PZT-M	2		1

MATERIAL (density, kN/m ³)	M	$\zeta = t/p_{co}$ (%)	λ
(8-13)			
CBT (15-23)	2.6	2	1
CSDT (>9)	1.8	5	1
CST-P (10-17)	3	1	1
RED TUFF (12)	3	6	1
YELLOW TUFF (10)	1.8	23	1
POZZOLANA NERA (14)	2	0.05	0.8
FINE-GRAINED TUFF (12-13)	2	0.13	0.8

7. Correlations Proposed.

-A number of correlations were obtained that allow estimating as a first approximation the values of uniaxial compression strength (σ_c) and isotropic collapse pressure (p_{ci}) of these materials as a function of the dry density (γ_d) and of the porosity thereof (n). The graphics most significant of these correlations are presented below:

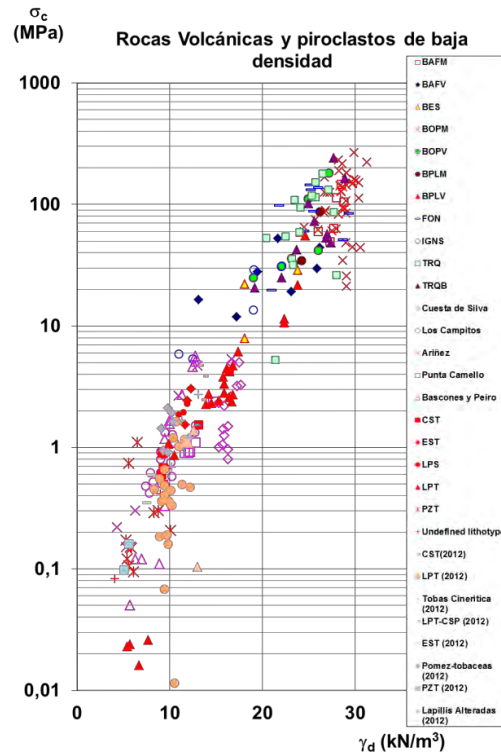


Fig. 6: Relationship between dry density and uniaxial compressive strength of different volcanic rocks and low-density pyroclasts rocks (after Serrano et al.2007). Total amount of samples: 256.

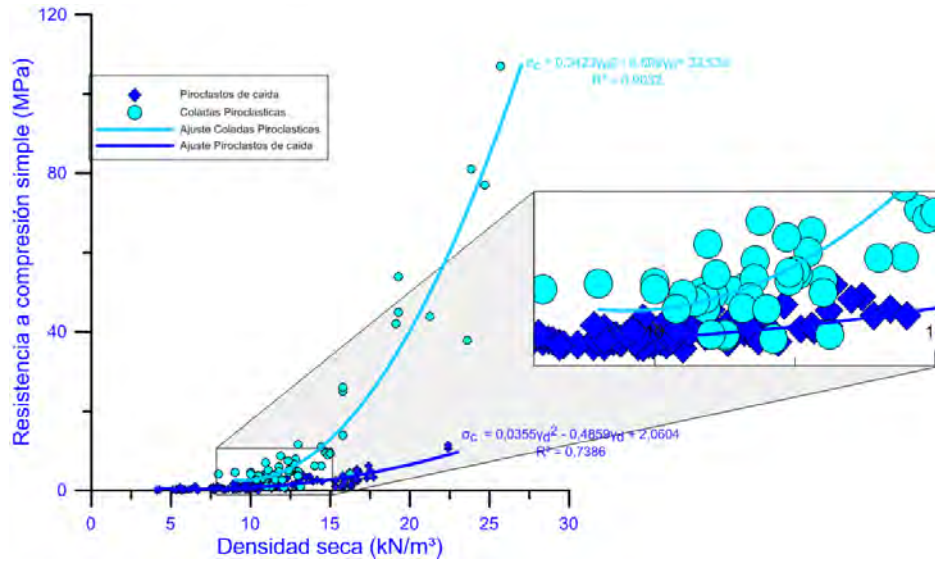


Fig.7: Adjustment of the uniaxial compressive strength with dry density for pyroclastic fall and pyroclastic flow.

-A single equation for isotropic collapse load of the macroporous rocks is proposed as:

$$p_{ci} = L\gamma \left(\frac{\gamma}{G - \gamma} \right)^\alpha$$

Where G, L and α are parameters to be test determined.

Values for the materials studied shown in Fig.6, were obtained.

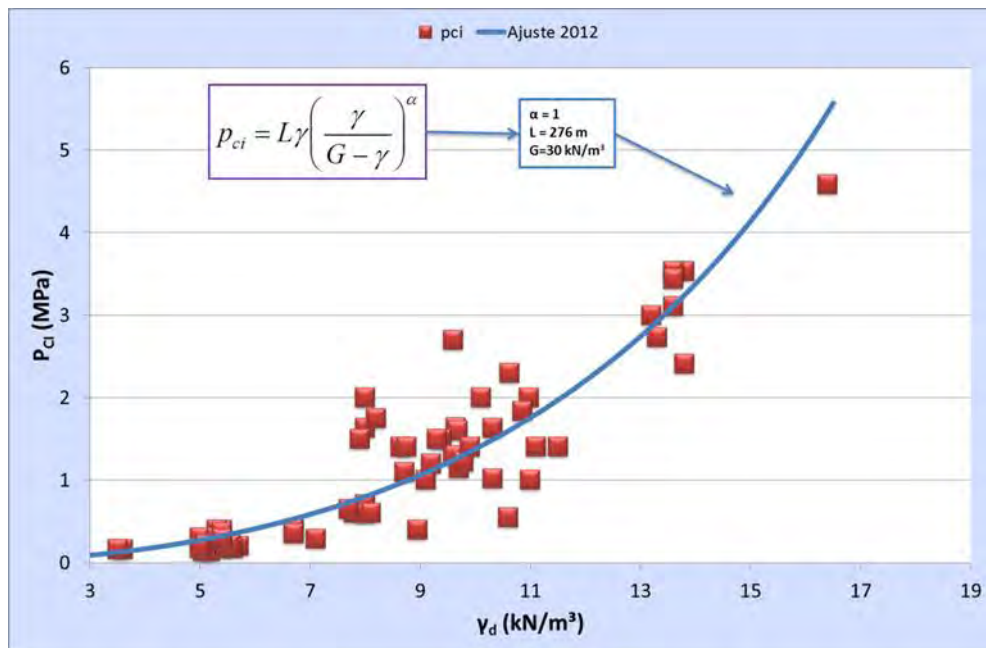


Fig.8: Adjustment of the isotropic collapse pressure (p_{ci}) with dry density (γ_d) in pyroclastic fall.

The scattering of the results can be attributed in part to the different values of initial porosity and partly to different degrees of welding and other structural features.

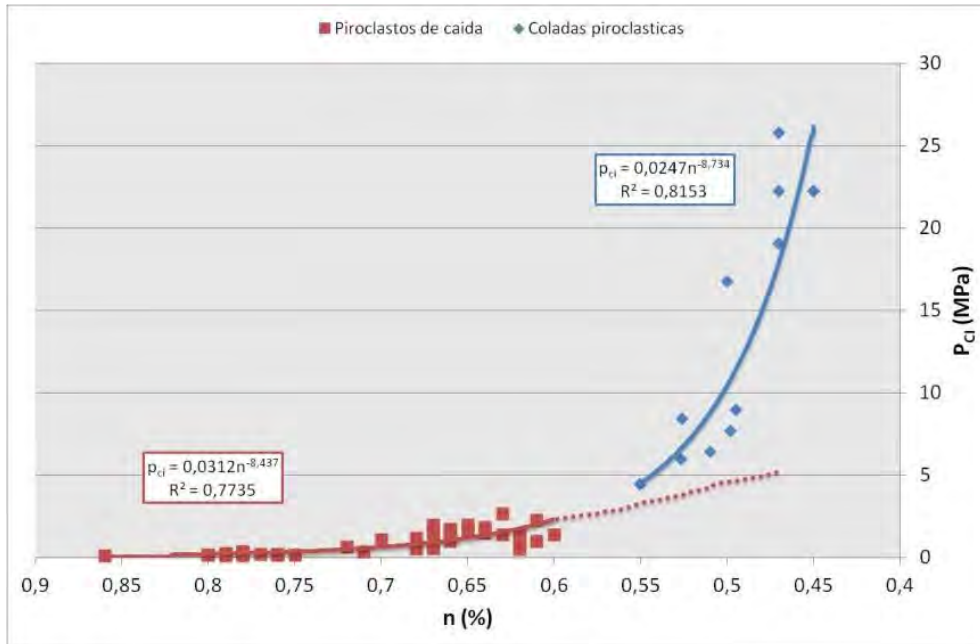


Fig.9: Set between the collapse pressure (p_{ci}) and porosity (n), both pyroclastic and lava flows in pyroclastic fall.

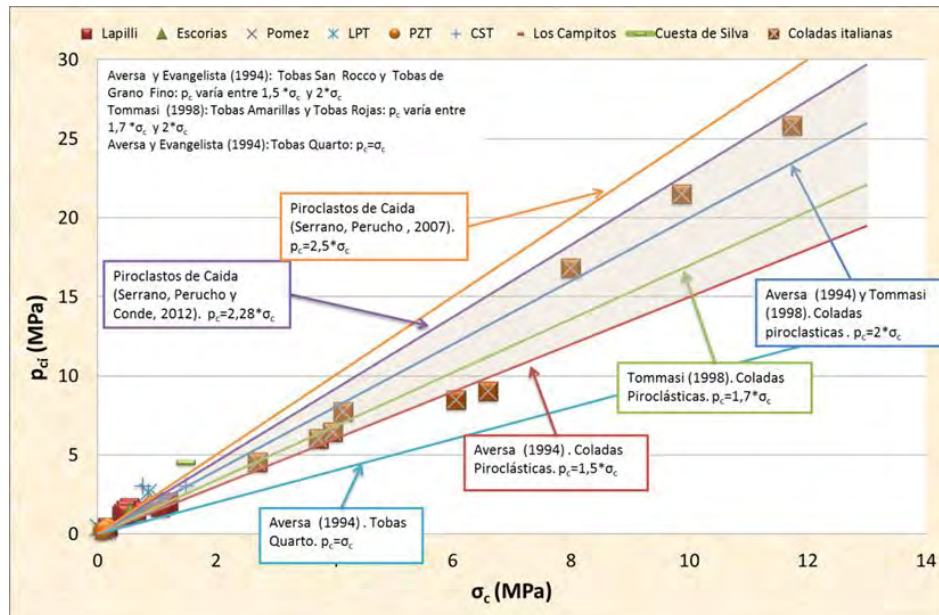


Fig.10: Relationship between isotropic collapse pressure, p_{ci} , and uniaxial compression strength, σ_c , in different types of pyroclastic rocks. The shaded area is the area with the highest occurrence of both data collected and tested during this research.

